



Concentración de PM_{2.5} y su relación con el flujo vehicular y las condiciones meteorológicas del norte de Ocaña (Colombia)

PM_{2.5} concentration and its relationship with vehicular flow and meteorological conditions in northern Ocaña, Colombia

Alexander Armesto Arenas ¹ y Julio Eduardo Cañón Barriga ²

Fecha de Recepción: 7 de marzo de 2022

Fecha de Aceptación: 16 de octubre de 2024

Cómo citar: Armesto Arenas A. y Cañón Barriga J.E. (2024). Concentración de PM_{2.5} y su relación con el flujo vehicular y las condiciones meteorológicas del norte de Ocaña (Colombia). *Tecnura*, 28(80), 39-59. <https://doi.org/10.14483/22487638.19165>

Resumen

Objetivo: En la zona norte de Ocaña existe una preocupación por la emisión de PM_{2.5} ocasionado por los automóviles, y se requiere evaluar su relación con el flujo vehicular y las condiciones meteorológicas.

Metodología: Se hicieron mediciones horarias de PM_{2.5} desde el 27 de enero de 2021 hasta el 9 de abril de 2021, por medio de un equipo electrónico para este propósito (Honeywell HPM115S0), aforo manual de vehículos y estaciones meteorológicas portátiles. El estudio de las variables se apoyó en análisis de correlación de Pearson, métrica de error, el modelo internacional de emisiones (IVE, por su sigla en inglés) y el modelo Envi-met3.1.


Resultados: Los tractocamiones presentan la mayor tasa de emisión (4,9 g/vehículo), y por cantidad, las motocicletas generan mayores emisiones. Debido a una posible inversión térmica, entre las 22:00 y 04:00 horas, el PM_{2.5} fue 102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y entre las 11:00 y 14:00, fue de 9,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, debido al viento. A 24 horas, se alcanzó un promedio de concentración de PM_{2.5} superior a la norma (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Así mismo, la concentración de PM_{2.5} obtuvo correlaciones significativas con la temperatura (-0,517), humedad relativa (0,492), velocidad del viento (-0,487) y vehículos (-0,497). En cuanto a la dispersión del PM_{2.5}, este se diluye de nororiente a suroccidente (>33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Conclusiones: Los factores climáticos y 40 778 vehículos/día que circulan por la vía nacional de la zona norte de Ocaña son significativamente influyentes en la variación del PM_{2.5}, cuyo promedio de concentraciones en 24 horas puede superar la norma (37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Financiamiento: Este proyecto contó con recursos propios, y de las universidades Francisco de Paula Santander Ocaña, y de Antioquia.

Palabras clave: contaminación del aire, clima, infraestructura de transporte, transporte urbano, transporte por carretera.

¹Magister en Gestión y Auditoría Ambiental, Ingeniero Ambiental. Docente Catedrático, Universidad Francisco de Paula Santander  Ocaña, Colombia. Email: aarmestoa@ufpso.edu.co

²PhD Hidrología, Ingeniero Civil. Docente titular, Universidad de Antioquia , Medellín, Colombia. Email: julio.canon@udea.edu.co

Abstract

Objective: In the northern area of Ocaña there is a concern about PM_{2.5} emissions caused by vehicles. For this reason, we evaluate the relationship of PM_{2.5} concentrations with vehicle flows and meteorological conditions.

Methodology: Measurements were performed since 27/01/2021 to 09/04/2021, using electronic equipment for the measurement of PM_{2.5} (Honeywell HPMA115S0), manual counting of vehicles and portable weather stations. The study of the variables was supported by Pearson correlation analysis, error metrics, the international emissions model (IVE) and the Envi-met3.1 model.

Results: Tractor-trucks have the highest emission rate (4,9 g/vehicle), but in terms of quantity, motorcycles generate the highest emissions. Due to a possible thermal inversion, between 22:00 and 04:00 hours the PM_{2.5} was 102 µg/m³ and, due to the wind, between 11:00 and 14:00 hours it showed 9,8 µg/m³. At 24 hours, the average PM_{2.5} concentration was higher than the norm (37 µg/m³). Likewise, PM_{2.5} concentration obtained significant correlations with temperature (-0,517), relative humidity (0,492), wind speed (-0,487) and vehicles (-0,497). As for the dispersion of PM_{2.5}, it is diluted from northeast to southwest of the area (>33 µg/m³).

Conclusions: Meteorological factors and 40 778 vehicles/day circulating on the national road north of Ocaña are significantly influential in the variation of PM_{2.5}, which 24-hour average concentrations can exceed the norm (37 µg/m³).

Financing: Own resources and resources from Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña and Universidad de Antioquia.

Keywords: Air pollution, climate, road transport, transport infrastructure, urban transport.

Introducción

En el mundo, existen diversos tipos de fuentes de emisión de PM_{2.5} (Chen *et al.*, 2019), entre las que las fuentes móviles son muy relevantes (Vu *et al.*, 2019). Investigaciones demuestran que el PM_{2.5} emitido por los vehículos alcanza a representar el 40 % del total de contaminación atmosférica (Arhami *et al.*, 2018), sin importar que los componentes químicos son de alto riesgo para la salud respiratoria y condiciones ambientales (Cuty y Mejía, 2019; Chung *et al.*, 2020).

Los vehículos emiten material particulado por el roce entre la llanta, el pavimento, el polvo adherido al chasis y sus neumáticos (Pachón *et al.*, 2020). No obstante, el PM_{2.5} lo emiten especialmente a nivel de exhosto por combustión del motor (Fang *et al.*, 2021). Este contaminante puede ser calculado en masa por kilómetro recorrido o masa por combustible consumido (Ntziachristos y Samaras, 2019), según el tamaño del vehículo (Hao *et al.*, 2021) y el tipo de combustible (Perry y Trompette, 2021). Una de las formas de valorar el nivel de peligrosidad consiste en medir los niveles de inmisión en términos de concentración (Feng *et al.*, 2021), teniendo en cuenta los elementos climáticos (Yi Cheng *et al.*, 2021). Así mismo, existen algoritmos apropiados para explorar cómo se dispersa (Jain *et al.*, 2021), como también para estimar los niveles de emisión (Yin *et al.*, 2017). Además, otras investigaciones determinan factores que indirectamente pueden tener efecto sobre el PM_{2.5}, como las paradas de autobuses, la alta movilidad vehicular, etc. (Serafín, 2019; Mahesh, 2021).

En Colombia, el tráfico vehicular es de gran preocupación (Silva, 2020) y los estudios acerca de PM_{2.5} se destacan en las grandes ciudades (Duarte *et al.*, 2021). El Ministerio de Medio Ambiente (2010) reconoce que, en 46 áreas, incluyendo municipios entre 50 000 y 150 000 habitantes no se tiene implementado el seguimiento y medición de PM_{2.5} (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2021). La ciudad de Ocaña está dentro de esas localidades, a pesar de que las autoridades competentes solo han medido el PM₁₀, pero sin oficializar los resultados.

Si bien la zona norte de Ocaña ha sido uno de los puntos de medición, es importante saber que este lugar es atravesado por una vía nacional con alto flujo vehicular, en especial de tráfico pesado (Instituto Nacional de Vías [Invías], s. f.). Por otro lado, la Secretaría de Movilidad y Tránsito informa que en la ciudad de Ocaña ha aumentado el parque automotor, en especial de motocicletas. Los registros también reconocen que esta ciudad se ha vuelto intransitable, debido al aumento del flujo vehicular y a la insuficiente capacidad de sus calles. Así mismo, según la Asociación Nacional de Centros de Diagnóstico Automotor (2020), en Ocaña se evade considerablemente la revisión técnico-mecánica. De acuerdo con lo mencionado, es muy probable que la zona norte esté presentando altos niveles de concentración de PM_{2.5}. De ahí la importancia de conocer la dependencia de este contaminante con el parque automotor, su dispersión, cuáles son las horas críticas y qué influencia tienen las condiciones meteorológicas.

Esta investigación analiza la concentración horaria de PM_{2.5} en el norte de la ciudad de Ocaña, y su relación con el flujo vehicular de la vía de primer orden que la atraviesa, las emisiones de los vehículos a nivel de exhosto y las condiciones meteorológicas, incluyendo un análisis de la dispersión apoyado en los resultados de los modelos IVE y Envi-met3.1.

Metodología

El estudio se realizó en el norte de la ciudad de Ocaña, situada en el nororiente colombiano a 1202 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.). La zona tiene un área de 1,68 km² y está atravesada por un tramo de vía de primer orden ondulada cuya longitud es de 1,6 km (figura 1). En la parte sur, la vía conecta la zona norte con el resto de Ocaña y permite el desplazamiento a la capital del departamento de Norte de Santander y Venezuela. En el norte, esta vía permite el acceso a cualquier parte del país. En el oriente y occidente, tiene vías terciarias que facilitan la comunicación con la zona rural del municipio. La zona norte de Ocaña se caracteriza por ser la segunda más comercial de la ciudad. Con ausencia de industrias, su actividad económica se ubica a los costados de la vía de primer orden, incluyendo terminales de transporte formales e informales. Los centros religiosos, educativos, parques, canchas, entre otros, se distribuyen por toda el área residencial.

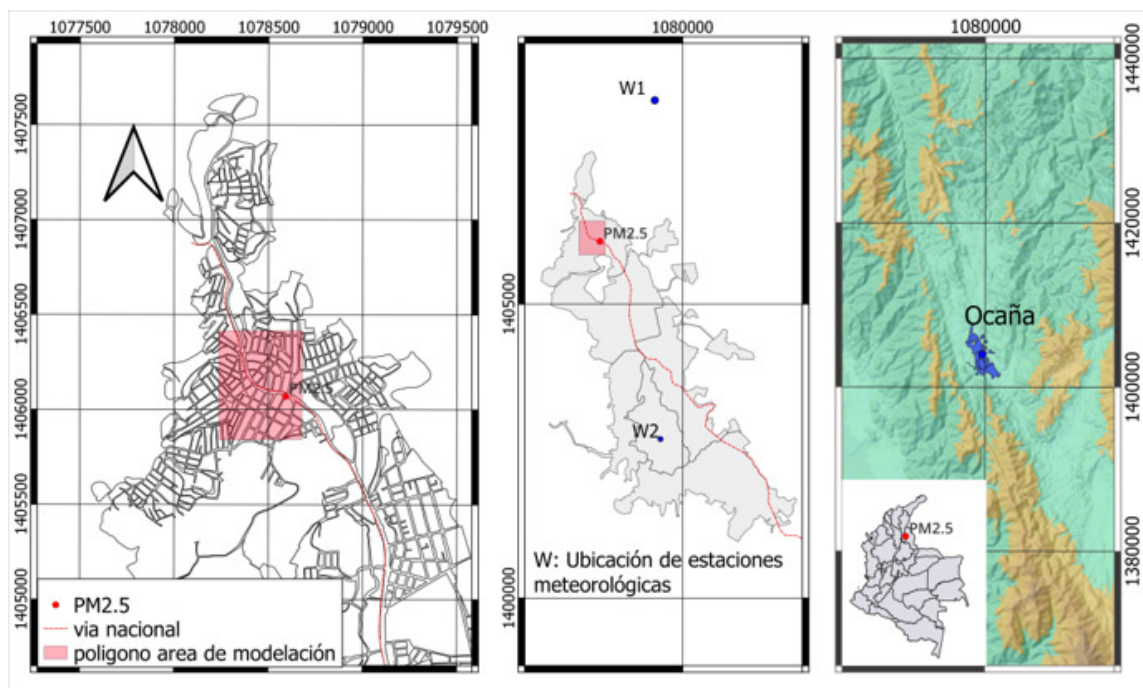


Figura 1. Perfil del tramo de la vía nacional que atraviesa el norte de la ciudad de Ocaña

La investigación fue de tipo cualitativo y cuantitativo. Se escogió la vía de primere orden que atraviesa la zona norte por ser la más transitada. La caracterización del parque automotor se hizo con visitas a parqueaderos, centros de diagnóstico vehicular, talleres de mecánica y con información secundaria facilitada por la Secretaría de Tránsito y Transporte, por el Instituto Nacional de Vías (Invías) y por empresas de transporte. La medición de la concentración de PM_{2.5} se hizo desde el 27 de enero de 2021 hasta el 9 de abril de 2021, con un equipo automático de marca Honeywell HPMA115S0, perteneciente a la empresa Ringeniería y recomendado por diferentes investigaciones ([Hong et al., 2021](#)), lo cual fue instalado en la parte más alta de la vía, a una distancia horizontal de 15 m y a una altura de 10 m. La medición abarcó también un aforo vehicular realizado por hora durante cinco días, desde el 11 hasta el 15 de febrero de 2021 con la ayuda de una filmación suministrada por el Centro Comercial Ciudadela Norte. Para la variabilidad de las concentraciones de PM_{2.5} se implementó un análisis de varianza y el modelo de correlación de Pearson, con el fin de hallar el grado de relación con las variables meteorológicas. Los datos meteorológicos fueron obtenidos de estaciones portátiles de la Alcaldía Municipal de Ocaña, de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y del aeropuerto de Ocaña. Para el análisis de patrones de conducción de los vehículos, se dispuso de un GPS de marca Garmin, y de repetidos viajes sobre los vehículos explicados en la tabla 1. Sin embargo, para los tractocamiones y camiones se hicieron persecuciones para estimar los respectivos patrones. Para hallar las diferencias significativas entre los volúmenes de tráfico se aplicó un análisis de varianza.

Tabla 1. Caracterización de los vehículos

Descripción de los vehículos	Grupos	
Motocicletas <100 cc	Motocicletas	Gasolina
100 <Motocicletas <300 cc		
300 <Motocicletas <500 cc		
Vehículos GVWR <2,5 t	Vehículos sedan y taxis	Gasolina Diésel
Vehículos GVWR 2,5 t <GVWR <3,3 t	Camionetas y camperos	
Vehículos GVWR 3,3 t <GVWR <4,5 t	Camionetas, microbuses y busetas	
Vehículos GVWR 4,5 t <GVWR <7 t	Camiones pequeños	
Vehículos 7 t <GVWR <16 t	Camiones medianos	
Vehículos GVWR >16 t	Camiones grandes (Tracto-camiones)	

Modelo de emisiones

Se trabajó con el modelo internacional de emisiones (IVE, por su sigla en inglés), suministrado por el Internacional Sustainable Systems Research Center ([ISSRC, s. f.](#)), el cual se basa en la estimación de emisiones por fuentes móviles a partir del comportamiento del vehículo (partida y en ruta), pendiente de la vía, combustible utilizado, condiciones ambientales, distancia de la vía de interés, antigüedad del vehículo y tipos de tecnología para control de emisiones vehiculares.

Para conocer la tecnología del parque automotor se hicieron 810 encuestas, de las cuales, 150 fueron registros de carros particulares, 30 de taxis, 100 de camionetas y camperos, 390 de motocicletas, 30 de camiones pequeños, 50 de camiones medianos y 60 de tractocamiones. El resto de información fue suministrada por los entes públicos mencionados y por las empresas de transporte, para un total de 4190 datos de vehículos analizados. Sin embargo, hubo limitaciones en cuanto a la definición de la tecnología del parque automotor. Al respecto, parte de los datos se estimaron a partir del modelo del automóvil y la normativa colombiana, puesto que los lugares destinados para la revisión técnico-mecánica no suministraron información. Así mismo, parte de los propietarios encuestados no tenían buen conocimiento acerca de la tecnología de sus vehículos y no se contó con una persona experta en mecánica automotriz.

Posteriormente, para calcular la distribución de emisiones por vehículo se multiplicó el factor de emisión (en términos de gramos/vehículo) por la cantidad de vehículos/hora que circula por la vía nacional que atraviesa la zona norte.

Modelo de dispersión

El modelo Envi-met 3.1 es un *software* gratuito utilizado en diversas investigaciones sobre emisiones atmosféricas y condiciones climáticas ([Huttner, 2012](#); [Ruí et al., 2019](#); [Mobarhan y Yeganeh, 2019](#); [Yola, 2022](#)). En nuestro estudio se aplicó este modelo sobre el área atravesada por el tramo vial con mayor estancamiento vehicular (0,19 km²) (figura 1). De este modo, primero se delimitó el área de estudio por medio de grillas (163 grillas en el eje *x* y 220 grillas en el eje *y*), cada grilla con alto de 2,45 m y 2,27 m de ancho. Posteriormente, sobre el plano de grillas se editó la infraestructura física del lugar (edificios, vías y zonas verdes), teniendo en cuenta sus características (tipo de pavimento, tipo de áreas verdes). En esta misma superficie de grillas se trazó la trayectoria de las fuentes móviles y se determinó la hora del día que se quiso modelar y la cantidad de emisión calculada en el modelo IVE. En este caso, se aplicó el modelo para cada hora de cuatro días consecutivos y se representó gráficamente la dispersión de concentración de PM_{2.5} de la hora con mayor emisión. Adicionalmente, para determinar la similitud entre el modelo y las mediciones reales, se halló el error absoluto medio (MAPE, por su sigla en inglés) y la correlación de Pearson, teniendo en cuenta las variables mostradas en la tabla 2. El MAPE está dentro de las métricas estadísticas utilizadas para medir el rendimiento del modelo en diferentes tipos de estudios ([Abiodun et al., 2019](#)).

El comportamiento de variabilidad de la concentración de PM_{2.5} mostrado en el modelo fue comparado con la medición real de PM_{2.5} en la fecha en que se implementó el modelo (11 de febrero de 2021-15 de febrero de 2021) como también con otras fechas donde ocurrieron bajas concentraciones (25 de marzo de 2021 y 27 de marzo de 2021) y altas concentraciones (6 de abril de 2021 a 9 de abril de 2021).

Es necesario resaltar que, durante el tiempo en que se hicieron las mediciones, en la región y en especial, en la zona de estudio, no se presentaron eventos de tipo social u orden público que pudieran afectar los respectivos registros.

Resultados

Los resultados indican que sobre la vía nacional que atraviesa la zona norte de Ocaña se alcanza un flujo vehicular de hasta 40 778 vehículos/día. El conteo de los cinco días mostró un flujo de 93 442 vehículos de norte a sur y 92 712 vehículos de sur a norte. El domingo tuvo

Tabla 2. Variables dependientes e independientes consideradas en el modelo

Variables dependientes	Variables independientes	Unidad de medida
Concentración de PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Humedad relativa	%
	Temperatura	°C
	Velocidad del viento	km/h
	Dirección del viento	Grados
	Emisiones	g/h

Nota: todas las variables fueron analizadas en términos de cantidad por hora.

una reducción de hasta 10 290 vehículos (figuras 2a, 2b). Del total de vehículos, la motocicleta y motocarga representan el 68 % (figura 2d), y del total de estos dos tipos de transporte, la motocarga significó el 0,66 %. Los carros y taxis representaron un 18 %; las camionetas y jeeps, un 7 %; los microbuses, un 3 %; los camiones pequeños, un 2 %; y los camiones medianos en conjunto con los tractocamiones, un 2 %. Entre las 18:00 y 17:00 horas del lunes se alcanzó el mayor flujo vehicular (2841 automóviles/hora).

La cantidad de vehículos que fluye en ambos sentidos es similar para las todas categorías, excepto para los tractocamiones que, de sur a norte, superaron en 256 vehículos/día al tránsito de norte a sur. No obstante, los resultados muestran diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los volúmenes de tránsito de las diferentes categorías vehiculares.

En el periodo del día comprendido entre las 07:00 y las 20:00 horas, los vehículos presentan constante estancamiento, una velocidad promedio de 23 km/h en ambos sentidos y una velocidad máxima de 40 km/h (figuras 3a, 3b). Por tanto, cualquier vehículo tarda entre 4 y 6 minutos en recorrer toda la vía. Al respecto, como lo hacen en grandes ciudades ([Ibraeva et al., 2021](#)), en Ocaña se han proyectado variantes viales que no se han materializado (figura 3c); sin embargo, lo propuesto podría aumentar la expansión demográfica ([Culma y García, 2022](#)) y en efecto aumentar las concentraciones de PM2.5 por aumento de movilidad ([Benavides y Leño, 2018](#)).

Las motocicletas que tienen la tecnología de dos ciclos y cuatro ciclos *–full injection* (FI)– representan el menor porcentaje, y el mayor porcentaje las de cuatro ciclos con carburador (tabla 3). En su mayoría, el resto de los vehículos tiene sistema de control de emisiones. A pesar de que los camiones son los que producen la mayor tasa de emisión de material particulado (tabla 4), son las motocicletas las que, por su cantidad, producen las mayores emisiones durante el día, mientras que la menor cantidad es de los microbuses.

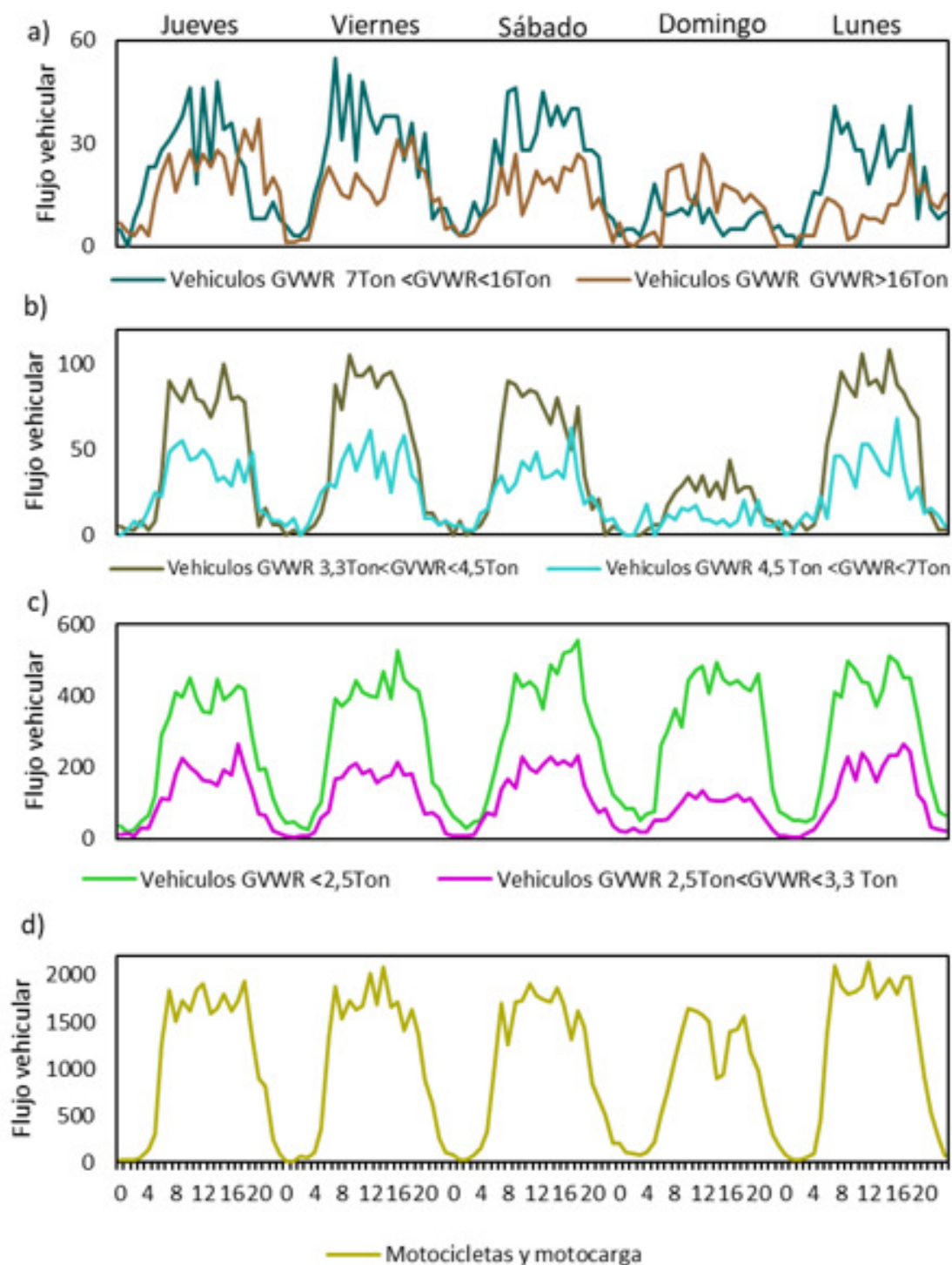


Figura 2. Mediciones del flujo vehicular en los cinco días de muestreo

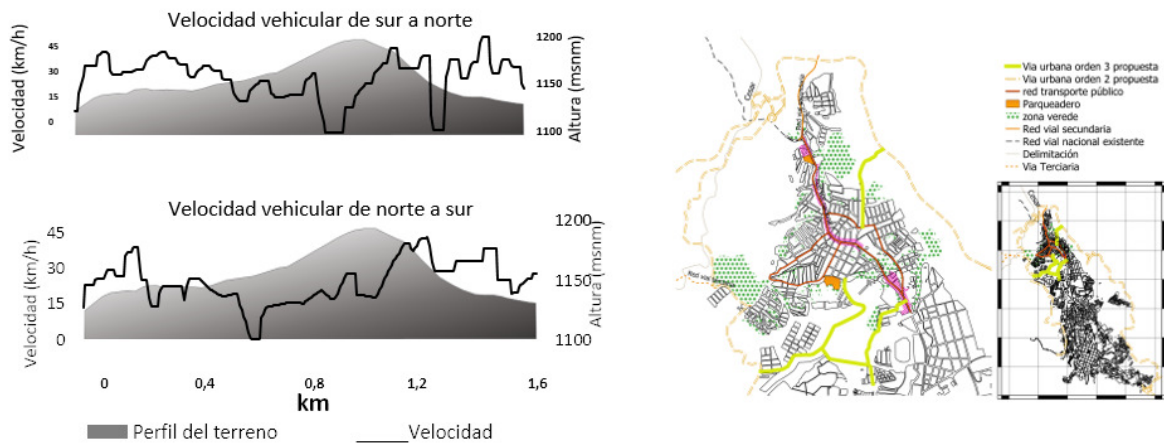


Figura 3. Velocidad de vehículos que transitan por la vía de la zona norte de Ocaña y propuestas de mejoramiento

Nota: c) elaborada a partir de [Alcaldía Municipal de Ocaña \(2015\)](#).

Tabla 3. Tecnología de los vehículos analizados

Tipo de vehículos	Combustible	Tamaño	Control combustible	Control exhosto	Edad	Fracción cantidad de vehículos (%)
Motocicletas	Gasolina	lt	2-cycle	Ninguno	0-25 K km	1
		lt	4-cycle, carb	Ninguno	0-25 K km	3
		lt	4-cycle, carb	Ninguno	26-50 K km	4
		med	4-cycle, carb	Ninguno	0-25 K km	24
		med	4-cycle, carb	Ninguno	26-50 K km	28
		med	4-cycle, carb	Ninguno	>50 K km	16
		lt	4-cycle, FI	Catalizador	0-25 K km	3
		lt	4-cycle, FI	Catalizador	26-50 K km	4
		med	4-cycle, FI	Catalizador	0-25 K km	16
		med	4-cycle, FI	Catalizador	26-50 K km	1

Carros particulares GVWR <2,5Ton	Gasolina	lt	Multi-Pt FI	Catalizador	80-161 K km	31
		lt	Multi-Pt FI	Catalizador	>161 K km	52
		lt	Multi-Pt FI	Catalizador	<79 K km	17
Taxis GVWR <2,5Ton	Gasolina	lt	Multi-Pt FI	Catalizador	>161 K km	100
2,5 t <GVWR <3,3 t	Gasolina	med	Carb	Ninguno	>161 K km	4
	Gasolina	med	FI	Catalizador	<79 K km	16
	Diésel	med	Dir-Inj	Catalizador	80-161 K km	36
	Gasolina	med	FI	Catalizador	>161 K km	45
3.3 t <GVWR <4,5 t	Diésel	med	FI	Euro II	>161 K km	100
4,5 t <GVWR <7 t	Diésel	lt	FI	Euro IV	>161 K km	20
		lt	FI	Euro II	80-161 K km	80
7 t <GVWR <16 t	Diésel	Me	Dir-inj	Ninguno	>161 K km	100
GVWR >16 t	Diésel	Hv	FI	Euro II	>161 K km	100

Tabla 4. Factores de emisión calculados

Tipo de vehículo	Fe (g/*veh)
Motocicletas	0,21
Vehículos GVWR <2,5 t	0,0101
Vehículos 2,5 t <GVWR <3,3 t	0,11
Vehículos GVWR 3,3 t <GVWR <4,5 t	1,1
Vehículos 4,5 t <GVWR <7 t	0,49
Vehículos 7 t <GVWR <16	3,6
Vehículos GVWR >16 t	4,9

El total de emisiones de los cinco días de análisis fue de 52 292,78 g, de los cuales las motocicletas representaron el 41 %; los camiones medianos y tractocamiones, el 28 %; las camionetas y camperos, el 19 %; colectivos, el 8 %; taxis y carros sedan, 2 %; y camiones pequeños, el 2 %. Los días jueves y viernes mostraron tasas de emisión de 16 383 g/día y 16 124 g/día; el sábado,

domingo y lunes, 15 902 g/día, 10 132 g/día, 15 599 g/día, respectivamente. El lunes a las 18:00 horas se tuvo la emisión más elevada, con un valor de 822,3 g. En general, entre las 06:00 y las 20:00 horas, la zona norte de Ocaña tiene emisiones vehiculares de PM2.5 superiores a 7000 g (figura 4).

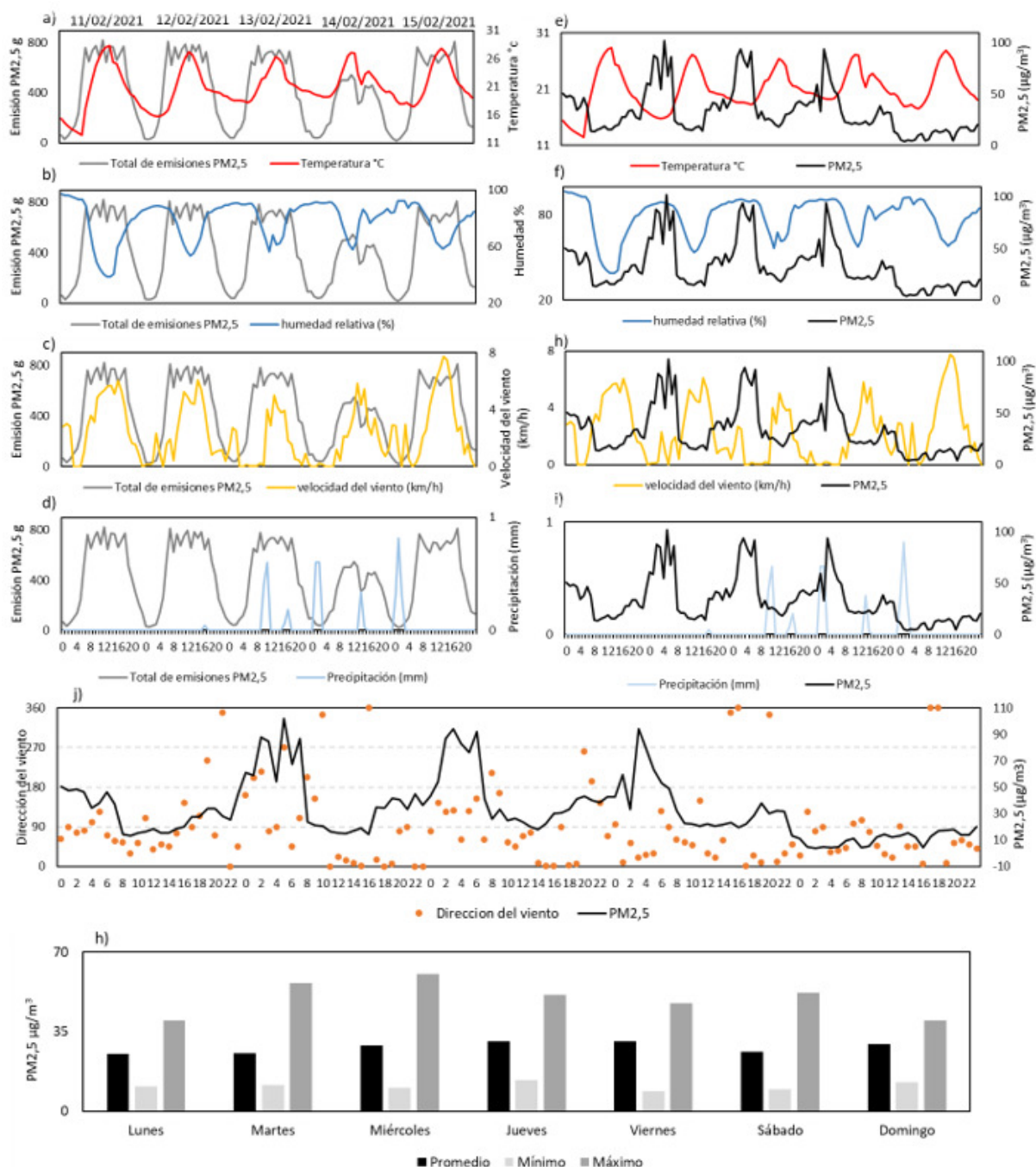


Figura 4. PM2.5, factores climáticos y emisión vehicular en la zona norte de Ocaña (Colombia)

Por otro lado, la concentración de PM2.5 mostró los mínimos valores con niveles máximos de emisión de PM2.5, debido a que la velocidad del viento fue mayor en comparación con las demás horas, como se observa en las figuras 4c y 4h. Al respecto, la figura 4j señala que el viento fuerte proveniente del norte presenta mayor capacidad de dilución de PM2.5, contrario a los vientos más débiles provenientes del sur, este u oeste, que en efecto propician un ambiente óptimo para que se eleven las concentraciones de PM2.5, en especial en horas de la madrugada. Según [Liu et al. \(2020\)](#), las direcciones del viento describen diferentes velocidades que ayudan a determinar los momentos en que se controlen de manera efectiva los aumentos de concentración de PM2.5. Por otro lado, la figura 4d muestra que la lluvia produce una disminución de las emisiones, debido a que incide en la reducción de la movilidad vehicular, como lo muestra la figura 2, y como también lo corroboran [Becker et al. \(2022\)](#), lo cual se explica porque, en general, en las urbes el tráfico vehicular decrece en los momentos de lluvia. Igualmente, de acuerdo con la figura 4h, la concentración del material particulado disminuye cuando hay mayor intensidad de lluvia. Según [Zhou et al. \(2020\)](#), esto ocurre por el lavado atmosférico que provoca el respectivo factor meteorológico. Por otro lado, en este estudio se observó que, para de los días en que se hizo el cálculo de emisiones, los viernes y sábados tuvieron concentraciones de PM2.5 superiores a la norma ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - 24 horas), con valores de 43,00 y 44,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y con una dilución predominante de noreste a suroeste (figura 4j). Sin embargo, no se puede afirmar que cada día se comporta igual en la siguiente semana. Al respecto, la figura 4h muestra que, en las diez mediciones efectuadas a cada uno de los días de la semana, se observan diferencias significativas entre las semanas evaluadas. No obstante, sí se puede decir que entre los días de la semana (lunes a domingo) no hay diferencia significativa.

En el modelo de dispersión aplicado, se tuvo en cuenta una humedad relativa de 74,17 %, temperatura 22,75°C, velocidad del viento de 2,47 km/h con dirección 10 grados noreste y una variación de altura de 0,8m, 2m y 8m sobre la vía. Al respecto, se contempla que, a baja altura la velocidad del viento disminuye y simultáneamente la concentración de PM2.5 aumenta y para alturas superiores, aumentan las velocidades del viento y disminuye la concentración del contaminante (figura 5). Igualmente, se observa que las concentraciones de PM2.5 se elevan en partes donde las edificaciones interrumpen el flujo de partículas. Este comportamiento también es corroborado por otros estudios ([Buccolieri et al., 2018](#)). Por otro lado, la dilución del PM2.5 se dirige hacia los barrios situados en el occidente de la vía estudiada con concentraciones de 67,22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superior a la norma nacional ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Según [Carrion et al. \(2019\)](#) este valor puede ser igual dentro de las casas.

En los cinco días continuos, el PM2.5 muestra una correlación significativa con la temperatura (-0,517), humedad relativa (0,492), velocidad del viento (-0,487) y vehículos (-0,497). Ahora bien, sin tener en cuenta el día con mayor lluvia (lunes), se muestra un aumento en el grado de

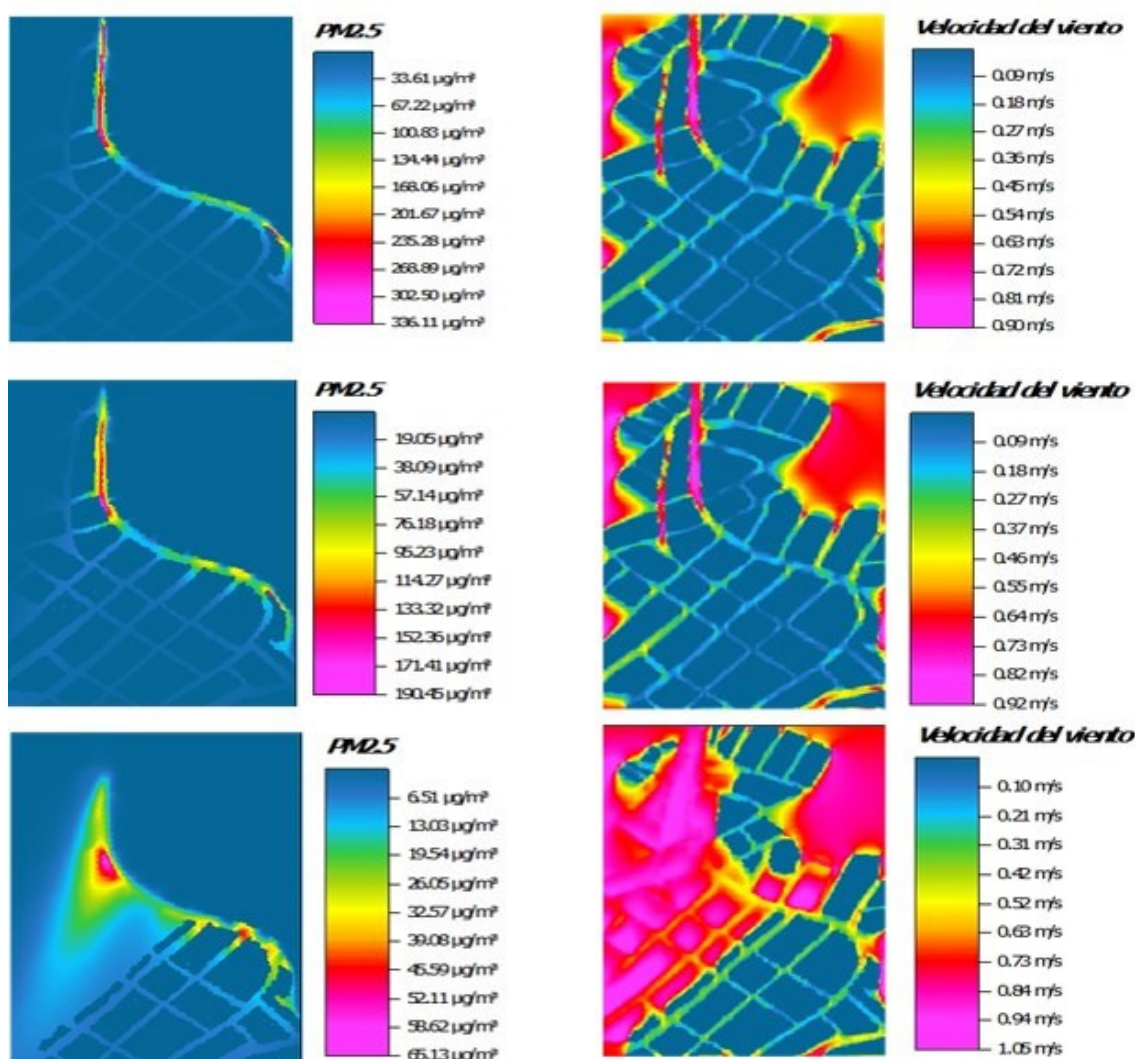


Figura 5. Modelo de dispersión de PM2.5 en Envi-met para la hora de mayor emisión

correlación entre las variables mencionadas, con valores de 0,64, 0,63, -0,60 y -0,63, respectivamente. No obstante, para un análisis de correlación de todas las mediciones de PM2.5, excepto para datos sin registros meteorológicos (50 datos válidos), se observó que las correlaciones disminuyeron, con valores de 0,090, 0,27, -0,43 y 0,3.

las correlaciones disminuyeron, con valores de 0,090, 0,27, -0,43 y 0,3. De los anteriores factores climáticos mencionados, la temperatura describe eventos en la atmósfera que pueden ocasionar altas concentraciones de PM2.5, una de ellas es la inversión térmica. De acuerdo con lo explicado por [Hu et al. \(2021\)](#) y [Kakareka y Salivonchyk \(2020\)](#), la inversión térmica provoca que el contaminante se acumule cerca de la superficie y suele ocurrir en horas de la madrugada

y con bajas velocidades del viento. Según [Mateos et al. \(2019\)](#), estos episodios atmosféricos son muy comunes en valles rodeados de altas montañas. Al respecto, lo explicado en la figura 1 demuestra que la zona norte de la ciudad de Ocaña es propicia para estos sucesos atmosféricos y, según lo observado en las figuras 6b, 6d y 6e, es notorio que la inversión térmica ocurre en horas de la madrugada. En esto, la figura 6a y el modelo Envi-met (figura 6d) demuestran que, cuando existen altas velocidades del viento y no ocurre la inversión térmica, se reduce significativamente la concentración de PM2.5. Del modelo mencionado se resalta que existen diferencias significativas con las mediciones realizadas, con un coeficiente de correlación significativo de 0,5 ($p < 0,05$) y un MAPE del 35 % entre el valor real y el pronosticado. Este grado de error es mayormente debido a las elevadas concentraciones de PM2.5 por causa de la in-

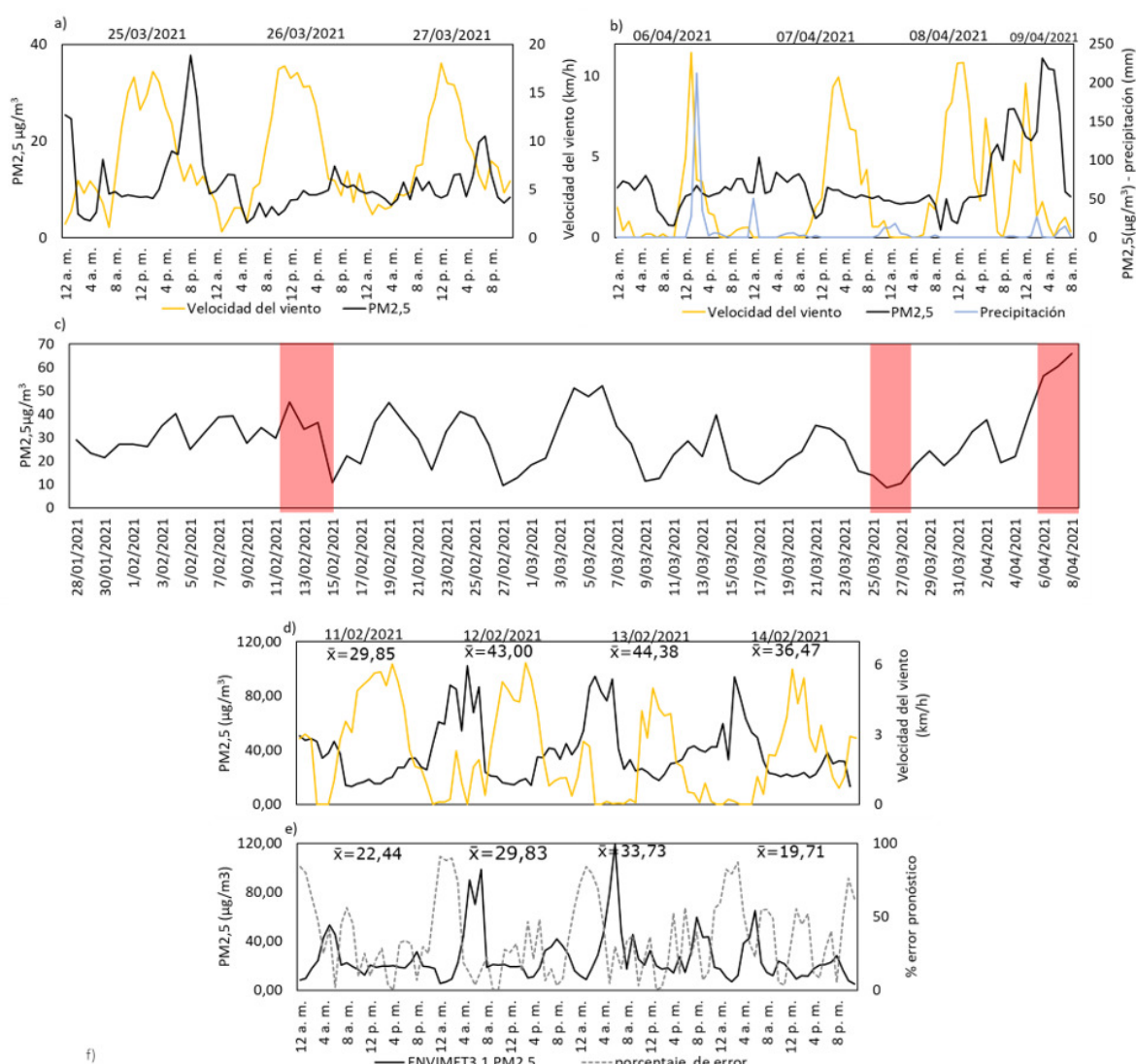


Figura 6. a), b), c), d) Concentraciones de PM2.5 medidas. e) Modeladas con Envi-met

versión de temperatura, especialmente en horas de la madrugada que, en efecto, el modelo no tiene en cuenta. Al respecto, haciendo el mismo análisis en horas diurnas (07:00-19:00), no se encontraron diferencias significativas e, incluso, se obtuvo un MAPE de 25,65 % y un índice de correlación de 0,7838. No obstante, el modelo sí permitió detallar de forma horaria el grado de concentración de PM2.5 que se alcanza cuando ocurren estos eventos atmosféricos.

También se evidencia que, en momentos de baja lluvia y disminución de la velocidad del viento, la concentración de PM2.5 se eleva y se prolonga durante uno o varios días consecutivos, tal como se observa en la figura 6b, lo cual demuestra que, según lo explicado por Wagner y Brandley (2020), la inversión térmica en la zona de estudio se da igualmente en horas diurnas y en momentos de lluvia.

Según datos suministrados por la [NASA \(s. f.\)](#), en la zona donde se encuentra ubicada Ocaña, se presentan dos épocas lluviosas: una entre marzo y abril, y otra más intensa y prolongada entre agosto y noviembre. Por tanto, las suposiciones establecidas de inversión térmica en la madrugada en el modelo y los valores observados para la zona de estudio son representativas de la dinámica de dispersión de PM2.5, y constituyen un avance para entender el posible impacto de esas concentraciones dentro de los barrios residenciales.

Conclusiones

Los vehículos que circulan por la vía nacional que atraviesa la zona norte de Ocaña son la principal fuente de emisión de material particulado PM2.5, especialmente las motocicletas. Sin embargo, la concentración de PM2.5 en la zona no depende solo del grado de las emisiones, sino también de factores meteorológicos que regulan las concentraciones de PM2.5 como el viento, la lluvia y la inversión térmica. Estos hacen que las concentraciones de PM2.5 (promedios en 24 horas) tengan una significativa variación a pesar de que las emisiones vehiculares totales diarias son semejantes.

Los resultados del modelo Envi-met permiten concluir que la infraestructura urbana localizada en los costados de la vía interrumpe la dispersión del PM2.5, lo que en efecto provoca una elevación considerable de la concentración del respectivo contaminante ($PM_{2.5} > 100 \mu g/m^3$) y, en consecuencia, genera un mayor impacto en la salud de la población flotante. Así mismo, permite evidenciar altas concentraciones desde la vía que atraviesa la zona norte hasta las áreas residenciales donde más se dispersa, teniendo en cuenta que, por filtración y acción acumulativa, han de esperarse altas concentraciones de PM2.5 dentro de las casas y, en efecto, los más afectados sean los habitantes de los barrios cercanos a la vía.

Si bien el modelo mencionado no tiene en cuenta eventos como la inversión térmica, la diferencia entre las mediciones modeladas y las reales lleva a concluir que dicha inversión tiene un impacto ambiental adverso significativo en la elevación de las concentraciones de PM_{2.5} en la zona norte de la ciudad de Ocaña.

Este estudio ejemplifica la situación del impacto adverso de la concentración de material particulado emitido por fuentes móviles en vías principales de ciudades intermedias de Colombia que, aunado a condiciones locales de humedad relativa, precipitación y velocidad del viento, pueden estar alcanzando niveles de contaminación preocupantes para la salud pública de sus habitantes en sectores localizados dentro de los barrios, de manera similar a lo que ocurre en las grandes ciudades de Colombia. Por esta razón, se recomienda que las administraciones locales de las ciudades intermedias aúnen esfuerzos con universidades y centros de investigación para medir y monitorear puntos críticos de contaminación en sus municipios.

Financiamiento

Este proyecto contó con recursos propios, y de las universidades Francisco de Paula Santander Ocaña, y de Antioquia.

Agradecimiento

Agradecemos a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, por su recurso humano y la disponibilidad de equipos e infraestructura; a la Universidad de Antioquia y su programa de Maestría en Gestión Ambiental, por su recurso humano; al Centro Comercial Ciudadela Norte, por el suministro de videos para el aforo vehicular, a la empresa Ringeniería, por el préstamo de equipos, y a la entidad bancaria Crediservir, por permitir los espacios para la instalación de equipos.

Referencias

- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Umar, A. M., Linus, O. U., Kazaure, A. A., Gana, U. y Kiru, M. U. (2019). Comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition. *IEEE Access*, 7, 158820-158846.
- Alcaldía Municipal de Ocaña (2015). *PBOT 2015 - Cartografía Urbana - Mapa Sistema Vial*. <https://www.ocana-nortedesantander.gov.co/planes/pbot-2015--cartografia-urbana--mapa-sistema-vial>

- Arhami, M., ZareShahne, M., Hosseini, V., Roufigar Haghighat, N., Lai, A. y Schauer, A. (2018). Seasonal trends in the composition and sources of PM2. 5 and carbonaceous aerosol in Tehran, Iran. *Environmental Pollution*, 239, 69-81.
- Asociación Nacional de Centros de Diagnóstico Automotor (enero-septiembre de 2020). *Cifras de revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes en Colombia*. Boletín estadístico. <https://www.aso-cda.org/wp-content/uploads/2020/10/BOLETIN-CIFRAS-ENE-SEP-2020.pdf>
- Becker, N., Rust, H. W. y Ulbrich, U. (2022). Modeling hourly weather-related road traffic variations for different vehicle types in Germany. *European Transport Research Review*, 14(1), 16.
- Benavides, T. y Leaño, A. (2018). Rol del estado en los procesos de urbanización periférica de las ciudades colombianas. *Margen*, 88, 1-9. http://www.margen.org/suscri/margen88/leano_88.pdf
- Buccolieri, R., Jeanjean, A. P., Gatto, E. y Leigh, R. J. (2018). The impact of trees on street ventilation, NOx and PM2. 5 concentrations across heights in Marylebone Rd street canyon, central London. *Sustainable Cities and Society*, 41, 227-241.
- Carrion, M. A., Kang, C. M., Gaffin, J. M., Hauptman, M., Phipatanakul, W., Koutrakis, P. y Gold, D. R. (2019). Classroom indoor PM2.5 sources and exposures in inner-city schools. *Environment International*, 131, 104968. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018324140>
- Chen, S., Zhang, X., Lin, J., Huang, J., Huang, J., Zhao, D., ... Xie, Y. Q. (2019). Fugitive road dust PM2.5 emissions and their potential health impacts. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 8455-8465. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00666>
- Chung Lin, Y., Ching Li, Y., Amesho, K., Shangdiar, S., Chih Chou, F. y Cheng Cheng, P. (2020). Chemical characterization of PM2.5 emissions and atmospheric metallic element concentrations in PM2.5 emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles. *Science of the Total Environment*, 739, 139942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139942>
- Culma-Tamara, M. F. y García-Ubaque, C. A. (2022). Multitemporal analysis of urban expansion in the municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020. *Tecnura*, 26(73), 7-7.
- Cuty Clemente, E. R. y Mejía Regalado, A. D. (2019). Influencia del biodiésel de aceite de fritura usado, sobre las emisiones: índice de opacidad. *Tecnura*, 23(59), 60-67.

- Duarte, A., Schneider, I., Artaxo, P. y Olivera, M. (2021). Spatiotemporal assessment of particulate matter (PM10 and PM2.5) and ozone in a Caribbean urban coastal city. *Geoscience Frontiers*, 13(1), 101168. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101168>
- Fang, S., Zhan, C., Hu, J., Yanfeng, X., Meng, Q., Yu, X., Wang, H., Wang, P., Zhang, R., y Gao, P. (2021). Temporal variations of PM2.5-bound platinum group elements in outdoor and indoor environments close to areas with traffic congestion. *Atmospheric Environment*, 246, 118109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118109>
- Feng Z. Y., Gao, J., Jian Cai, Y., Jing Wang, J. y Pan, J. (2021). Real-time tracing VOCs, O3 and PM2.5 emission sources with vehicle-mounted proton transfer reaction mass spectrometry combined differential absorption lidar. *Atmospheric Pollution Research*, 12, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.008>
- Hao, Y., Deng, S., Qui, Z., Lu, Z., Song, H. y Yang, N. (2021). Chemical characterization of PM2.5 emitted from China IV and China V light-duty vehicles in China. *Science of the Total Environment*, 783, 147101 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147101>
- Hong, G. H., Le, T. C., Tu, J. W., Wang, C., Chang, S. C., Yu, J. Y., ... Tsai, C. J. (2021). Long-term evaluation and calibration of three types of low-cost PM2.5 sensors at different air quality monitoring stations. *Journal of Aerosol Science*, 157, 105829. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105829>
- Hu, J., Zhao, T., Liu, J., Cao, L. X., Wang, C., Zhao, X., Gao, Z., Shu, Z. y Li, Y. (2021). Nocturnal surface radiation cooling modulated by cloud cover change reinforces PM2.5 accumulation: Observational study of heavy air pollution in the Sichuan Basin, Southwest China. *Science of the Total Environment*, 794, 148624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148624>
- Huttner S. (2012). *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met* [Tesis de doctoral]. Johannes Gutenberg-Universität Mainz. <https://openscience.uni-mainz.de/handle/20.500.12030/2024>
- Ibraeva, A., Wee, B. V., Correia, G. H. y Antunes, A. P. (2021). Longitudinal macro-analysis of car-use changes resulting from a TOD-type project: The case of Metro do Porto (Portugal). *Journal of Transport Geography*, 92, 103036. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103036>
- NASA. (s. f.). *The POWER project*. <https://power.larc.nasa.gov/>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2021). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia. 2019*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/InformeCalidadAire_2019.pdf

- Instituto Nacional de Vías [Invías]. (s. f.). *Galería de volúmenes de tránsito*. <https://hermes.invias.gov.co/volumenes/>
- Internacional Sustentable Systems Research Center (ISSRC). (s. f.). *Internacional vehicle emissions model*. <http://www.issrc.org/>
- Jain, S., Presto, A. y Zimmerman, N. (2021). Spatial modeling of daily PM2.5, NO2, and CO concentrations measured by a low-cost sensor network: Comparison of linear, machine learning, and hybrid land use models. *Environmental Science Technology*, 55(13), 8631-8641. <https://doi.org/10.1021/acs.es>
- Kakareka, S. y Salivonchyk, S. (2020). Assessment of atmospheric pollutant dispersion from mobile sources in Antarctica: A case study of Vecherny Oasis. *Polar Geography*, 43(4), 280-294.
- Liu, Z., Shen, L., Yan, C., Du, J., Li, Y. y Zhao, H. (2020). Analysis of the influence of precipitation and wind on PM2. 5 and PM10 in the Atmosphere. *Advances in Meteorology*, (1), 1-13.
- Mahesh, S. (2021). Exposure to fine particulate matter (PM2.5) and noise at bus stops in Chennai, India. *Journal of Transport & Health*, 22, 101105. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101105>
- Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Tavera Busso, I. y Carreras, H. A. (2019). Influence of meteorological variables and forest fires events on air quality in an urban area (Córdoba, Argentina). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77, 171-179.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2010). *Manual de diseño de sistemas de vigilancia de calidad del aire*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- Mobarhan, M. y Yeganeh, M. (2019). Analyzing the influence of different streets and physical enclosures in reducing the amount of suspended particles in pedestrian streets. *American Journal of Research*, 120, 120-128.
- Ntziachristos, L. y Samaras, Z. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Europa Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Pachon, J., Vanegas, S., Saavedra, C., Amato, F., Silva, L. F. O, Blanco, K., Chaparro, R. y Casas, O. M. (2020). Evaluation of factors influencing road dust loadings in a Latin American urban center. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 71, 268-280. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1806946>

- Perry, D. y Trompette, W. (2021). The rise of non-tailpipe motor vehicle emissions in a Southern hemisphere city. *Air Quality and Climate Change*, 55(1), 44-45. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.799503548907636>
- Ruí, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E. y Ding, W. (2019). Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation*, 12, 183-194. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Secretaría de Movilidad y Tránsito de Ocaña. (2010). *Formulación del plan maestro de movilidad del municipio de Ocaña*. https://ocananortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/ocananortedesantander/content/files/000069/3450_plan_de_movilidad.pdf
- Serafín González, S. L. (2019). Externalidades de las emisiones del transporte público en Tepic, México: cambio climático y sustentabilidad. *Tecnura*, 23(62), 34-44.
- Silva, A. D. (2020). Políticas globales para las ciudades en movimiento: el papel de los think tanks en la proliferación de sistemas de transporte rápido de autobuses en América Latina y el mundo. *Política y Sociedad*, 39(1), 70-90.
- Vu, D., Patrick, R., Berte, T., Yanga, J., Cocker, D., Durbin, T., ... Awuku, A. (2019). Using a new Mobile Atmospheric Chamber (MACH) to investigate the formation of secondary aerosols from mobile sources: The case of gasoline direct injection vehicles. *Journal of Aerosol Science*, 133, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.03.009>
- Wagner, D. R. y Brandley, D. C. (2020). Exercise in thermal inversions: PM2.5 air pollution effects on pulmonary function and aerobic performance. *Wilderness & Environmental Medicine*, 31(1), 16-22.
- Yi Cheng, F., Yung Feng, C., Min Yang, Z., Hua Hsu, C., Wa Chan, K., Ying Lee, C. y Chin Chang, S. (2021). Evaluation of real-time PM2.5 forecasts with the WRF-CMAQ modeling system and weather-pattern-dependent bias-adjusted PM2.5 forecasts in Taiwan. *Atmospheric Environment*, 244, 117909.
- Yin, X., Huang, Z., Zheng, J., Yuan, Z., Zhu, W., Huang, X. y Chen, D. (2017). Source contributions to PM2.5 in Guangdong province, China by numerical modeling: Results and implications. *Atmospheric Research*, 186, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.007>
- Yola, L. (2022). Influence of urban canyon direction on long wave radiation pattern in a tropical context. En E. M. Nia, I. Farshchi, L. Yola y M. Awang (eds.), *Sustainable development approaches: Selected Papers of AUA and ICSGS 2021* (pp. 143-151). Springer International Publishing.

Zhou, Y., Yue, Y., Bai, Y. y Zhang, L. (2020). Effects of rainfall on PM2. 5 and PM10 in the middle reaches of the Yangtze river. *Advances in Meteorology*, (1), 1-10.

