

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**Análisis de la Calidad del Aire de la ciudad de Cuenca durante el año 2022
basadas en la red de microsensores a escala urbana**

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Ambiental

Autor:

Kevin Paul Chavez Loja

Director:

Rubén Fernando Jerves Cobo

ORCID:  0000-0002-7141-2390

Cuenca, Ecuador

2023-07-21

Resumen

El crecimiento poblacional en las zonas urbanas ha causado el deterioro de la calidad del aire afectando a la salud de sus pobladores y al medio ambiente; por lo que para tener un control de la contaminación del aire es importante el monitoreo del mismo. En este sentido la ciudad de Cuenca – Ecuador, ha implementado una red de monitoreo constituido por microsensores localizados a escala vecinal y analizadores automáticos a escala urbana. El estudio consistió de un análisis descriptivo y correlacional usando la información obtenida por los microsensores y analizadores automáticos pertenecientes a la Red de Monitoreo de Cuenca durante el año 2022. El análisis corresponde a información de la calidad del aire de parámetros como MP_{10} , $MP_{2.5}$, CO, O_3 , NO_2 y SO_2 ; y de variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento. Por otra parte, el análisis observacional permitió distinguir el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes indicados y su comparación con la normativa nacional, así como con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. La información fue procesada por varias funciones del paquete “Openair” por medio del software RStudio, resultados que sirvieron para la interpretación de la calidad del aire a escala vecinal y urbana. Además, se determinó una buena correlación entre los valores obtenidos por los microsensores de CO y NO_2 , y un buen ajuste a un modelo lineal para el microsensor de O_3 en comparación con los valores registrados por la estación automática. Finalmente, el presente estudio permitió sugerir posibles fuentes de emisión y distinguir patrones de contaminación.

Palabras clave: contaminantes atmosféricos, red de monitoreo, openair, zonas urbanas, medio ambiente



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Population growth in urban areas has caused the deterioration of air quality, affecting the health of its inhabitants and the environment; consequently, the monitoring of air pollution is an important tool for its control. In this sense, the city of Cuenca - Ecuador, has implemented a monitoring network consisting of microsensors located on a neighboring scale and automatic analyzers on an urban scale. The study consisted of a descriptive and correlational analysis using the information obtained by the microsensors and automatic analyzers belonging to the Cuenca Monitoring Network during the year 2022. The analysis corresponds to air quality information from parameters such as MP_{10} , $MP_{2.5}$, CO, O_3 , NO_2 , and SO_2 and from weather variables such as wind speed and wind direction. Furthermore, the observational analysis allowed to distinguish the behavior of the concentrations of indicated pollutants and their comparison with national regulations as well as with the recommendations given by the World Health Organization. The information was processed by various functions of the "Openair" package by means RStudio software, resulting in outcomes that served for the interpretation of air quality on a neighboring and urban scale. Additionally, a good correlation was determined between the values obtained by the CO and NO_2 microsensors, and a good adjustment to a linear model was made for the O_3 microsensor compared with values recorded from the automatic station. Finally, the present study allowed us to suggest possible emission sources and distinguish pollution patterns.

Keywords: atmospheric pollutants, monitoring network, openair, urban areas, environment



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenidos

Resumen	2
Abstract.....	3
Lista de abreviaturas y acrónimos.....	11
Capítulo 1	14
1. Introducción	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Problemática.....	14
1.3. Justificación	15
1.4. Objetivos.....	17
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	17
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i>	17
Capítulo 2	17
2. Fundamento teórico	17
2.1. Atmósfera y aire ambiente	17
2.2. Emisión e inmisión.....	17
2.3. Contaminación del aire	18
2.4. Contaminantes primarios y secundarios	18
2.5. Contaminantes criterio del aire	19
2.5.1. <i>Monóxido de carbono (CO)</i>	20
2.5.2. <i>Ozono (O₃)</i>	20
2.5.3. <i>Dióxido de azufre (SO₂)</i>	20
2.5.4. <i>Dióxido de nitrógeno (NO₂)</i>	20
2.5.5. <i>Material particulado (MP₁₀) y (MP_{2.5})</i>	21
2.6. Contaminantes del aire exterior: Fuentes y Efectos	22
2.7. Escala de monitoreo	24
2.8. Red de microsensores o sensores de bajo costo.....	25
2.8.1. <i>Composición de una estación de microsensores</i>	25
2.9. Información meteorológica.....	27
2.10. Norma Ecuatoriana de calidad del aire	29
2.11. Guías de la OMS de 2005 y la actualización mundial 2021	29
2.12. Umbral de datos válidos	30
2.13. Openair un paquete de RStudio	31
2.14. Estadística descriptiva.....	32
2.15. Pruebas de normalidad	33

2.16.	Correlación de “Spearman”	33
2.17.	Transformación “Box – Cox”	33
2.18.	Regresión lineal simple	34
Capítulo 3	35
3.	Metodología.....	35
3.1.	Área de estudio.....	35
3.2.	Descripción general de la Red de Monitoreo (RM) de la EMOV – EP	36
3.3.	Ubicación microsensores	41
3.4.	Fuente y validación de los datos.....	42
3.4.1.	<i>Fuente de datos</i>	42
3.4.2.	<i>Validación de datos</i>	42
3.5.	Descripción de la metodología de análisis	44
3.6.	Análisis preliminar de los datos.....	44
3.7.	Análisis geoespacial	45
3.8.	Análisis de la calidad del aire con el paquete “Openair”	45
3.8.1.	<i>Requisitos para la entrada de datos</i>	45
3.9.	Análisis direccional	46
3.10.	Gráficas polares	46
3.11.	Distribución espacial por gráficos polares.....	47
3.12.	Variaciones temporales y tendencias	47
3.13.	Análisis de regresión y correlación	48
3.14.	Análisis de los datos sobre la base de excedencias	51
3.14.1.	<i>Diagramas de calendario</i>	52
3.15.	Comparación de la NECA y OMS por series temporales.....	52
Capítulo 4	53
4.	Resultados y discusión	53
4.1.	Análisis descriptivo de los datos	53
4.2.	Resumen gráfico.....	57
4.3.	Cobertura espacial.....	60
4.4.	Análisis direccional	61
4.4.1.	Mapa de frecuencias de la dirección y velocidad del viento.....	61
4.4.2.	Gráficos polares estación MUN, EIE y CCA	63
4.4.3.	Mapas con gráficos polares por estación.....	67
4.5.	Variaciones temporales	70
4.6.	Análisis de regresión y correlación estación MUN	80

4.7. Valores de lambda.....	82
4.8. Evaluación de la transformación Box – Cox.....	83
4.9. Evaluación del modelo.....	86
4.10. Excedencias en la NECA y OMS.....	87
4.10.1. <i>Calendarios de contaminación en 24 horas</i>	88
4.10.2. <i>Limites en la NECA y OMS</i>	92
4.11. Discusión.....	98
4.11.1. <i>Calidad del aire en la ciudad de Cuenca</i>	98
4.11.2. <i>Relación entre metodologías de monitoreo (I) y (II)</i>	101
4.11.3. <i>Superaciones en la normativa nacional y guías de la OMS</i>	102
Capítulo 5	104
5. Conclusiones y recomendaciones.....	104
5.1. Conclusiones	104
5.2. Recomendaciones	106
Referencias.....	107
Anexos.....	112
Anexos 1: Resumen estadístico datos 2022 subred de microsensores (I)	112
Anexos 2: Resumen gráfico de los datos disponibles	114
Anexos 3: Variaciones horarias, diarias y mensuales para las estaciones CCA, EIE y TET monitoreados por (I) durante el 2022	118
Anexos 4: Mapas de calor horarios y por dirección del viento estación EIE y CCA monitoreados por (I) durante el 2022	120
Anexos 5: Curvas de densidad por (I) y (II) antes y después de la transformación	124

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de contaminación atmosférica.....	18
Figura 2: Clasificación de los contaminantes	19
Figura 3: Tamaño de partículas	21
Figura 4: Ítems que conforman la estación CON subred de microsensors	26
Figura 5: Sensores de bajo costo al interior del gabinete de protección.....	26
Figura 6: Dirección del viento.....	28
Figura 7: Gráfica polar bivariado para MP ₁₀ estación AURN de Port Talbot año 2000	31
Figura 8: División parroquial urbana del cantón Cuenca	35
Figura 9: División territorial del cantón Cuenca	36
Figura 10: Ubicación de las estaciones de monitoreo de la EMOV - EP.....	37
Figura 11: Estación MUN (Centro Histórico)	39
Figura 12: Estación EIE - Sur.....	40
Figura 13: Estación CCA - Norte.....	40
Figura 14: Ubicación geográfica de la subred de microsensors en la ciudad de Cuenca ..	42
Figura 15: Diagramas de caja para MP ₁₀ y MP _{2.5} subred de microsensors (I) durante el 2022	54
Figura 16: Diagramas de caja para CO y O ₃ subred de microsensors (I) durante el 2022 ..	55
Figura 17: Diagramas de caja para NO ₂ y SO ₂ subred de microsensors (I) durante el 2022	56
Figura 18: Resumen gráfico de la estación MUN monitoreados por (II) durante el 2022	58
Figura 19: Resumen gráfico de la estación CCA monitoreados por (I) durante el 2022.....	59
Figura 20: Resumen gráfico de la estación EIE monitoreados por (I) durante el 2022	60
Figura 21: Cobertura espacial de la RM de la EMOV - EP	61
Figura 22: Mapa de frecuencias de vientos para las estaciones meteorológicas de la EMOV - EP.....	62
Figura 23: Gráficos polares de la estación MUN monitoreados por (II) durante el 2022	63
Figura 24: Gráficos polares de la estación CCA monitoreados por (I) durante el 2022.....	64
Figura 25: Gráficos polares de la estación EIE monitoreados por (I) durante el 2022	66
Figura 26: Representación espacial de los gráficos polares de MP ₁₀ (µg/m ³) año 2022.....	67
Figura 27: Representación espacial de los gráficos polares de CO (mg/m ³) año 2022	68
Figura 28: Representación espacial de los gráficos polares de O ₃ (µg/m ³) año 2022.....	69
Figura 29: Representación espacial de los gráficos polares de NO ₂ (µg/m ³) año 2022	70
Figura 30: Variación en las concentraciones promedio de MP ₁₀ y MP _{2.5} (µg/m ³) estación MUN por (II)	71

Figura 31: Variación en las concentraciones promedio de CO (mg/m ³) estación MUN por (II)	72
Figura 32: Variación en las concentraciones promedio de O ₃ y NO ₂ (µg/m ³) estación MUN por (II)	73
Figura 33: Variación en las concentraciones promedio de SO ₂ (µg/m ³) estación MUN por (II)	74
Figura 34: Variación horaria, mensual y diaria de MP ₁₀ (µg/m ³) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	75
Figura 35: Variación horaria, mensual y diaria de CO (mg/m ³) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	76
Figura 36: Variación horaria, mensual y diaria de SO ₂ (µg/m ³) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	77
Figura 37: Mapas de calor por hora del día estación MUN por (II)	78
Figura 38: Mapas de calor por dirección del viento estación MUN por (II)	79
Figura 39: Diagramas de dispersión de los contaminantes criterio monitoreados por (I) y (II)	80
Figura 40: Matriz de correlación de “Spearman”	82
Figura 41: Función log de máxima verosimilitud para valores de lambda	83
Figura 42: Dispersión de los datos antes y después de la transformación	84
Figura 43: Gráficos Q-Q Plot antes y después de la transformación	84
Figura 44: Calendario de concentración de MP _{2.5} durante el 2022 estación MUN	88
Figura 45: Calendario de concentración de MP ₁₀ durante el 2022 estación MUN	89
Figura 46: Calendario de concentración de SO ₂ durante el 2022 estación MUN	90
Figura 47: Calendario de concentración de NO ₂ durante el 2022 estación MUN	91
Figura 48: Calendario de concentración de CO durante el 2022 estación MUN	92
Figura 49: Serie temporal promedio diaria MP ₁₀ MUN (II)	93
Figura 50: Serie temporal promedio diaria MP _{2.5} MUN (II)	94
Figura 51: Serie temporal promedio diaria NO ₂ MUN (II)	94
Figura 52: Serie temporal promedio diaria SO ₂ MUN (II)	95
Figura 53: Serie temporal promedio diaria MP ₁₀ TET (I)	96
Figura 54: Serie temporal promedio diaria MP _{2.5} TET (I)	96
Figura 55: Serie temporal promedio diaria NO ₂ TET (I)	97
Figura 56: Serie temporal promedio diaria SO ₂ TET (I)	98
Figura 57: Resumen gráfico estación CON monitoreado por (I) durante el 2022	114
Figura 58: Resumen gráfico estación CEB monitoreado por (I) durante el 2022	115
Figura 59: Resumen gráfico estación TET monitoreado por (I) durante el 2022	116

Figura 60: Resumen gráfico estación MUN monitoreado por (I) durante el 2022	117
Figura 61: Variación horaria, mensual y diaria de $MP_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	118
Figura 62: Variación horaria, mensual y diaria de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	118
Figura 63: Variación horaria, mensual y diaria de O^3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)	119
Figura 64: Mapas de calor horarios para la estación EIE monitoreados por (I).....	120
Figura 65: Mapas de calor por dirección del viento para la estación EIE por (I)	121
Figura 66: Mapas de calor horarios para la estación CCA por (I)	122
Figura 67: Mapas de calor por dirección del viento para la estación CCA por (I).....	123
Figura 68: Curvas de densidad $MP_{2.5}$ por (I) y (II)	124

Índice de tablas

Tabla 1: Principales efectos y fuentes de emisión.....	22
Tabla 2: Escalas de monitoreo espacial.....	24
Tabla 3: Términos para la dirección del viento.....	28
Tabla 4: Resumen de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire NECA (2011).....	29
Tabla 5: Comparación de la NECA con los valores guía de la OMS 2005 y 2021.....	30
Tabla 6: Ubicación del cantón Cuenca - Ecuador en Sudamérica.....	35
Tabla 7: Código, dirección, contaminantes monitoreados y escala de monitoreo.....	37
Tabla 8: Método de medición de la estación automática MUN.....	39
Tabla 9: Código, nombre, dirección, contaminantes monitoreados y escala de monitoreo..	41
Tabla 10: Porcentaje de datos válidos durante el 2022 por estación y metodología de monitoreo.....	43
Tabla 11: Cantidad de datos válidos por estación y metodología de monitoreo.....	43
Tabla 12: Resumen estadístico de las estaciones que cuentan con analizadores automáticos (II).....	53
Tabla 13: Fechas de valores máximos de concentración durante el 2022 monitoreados por (I) y (II).....	56
Tabla 14: Resumen estadístico por estación.....	62
Tabla 15: Resumen de pruebas de normalidad.....	81
Tabla 16: Evaluación de datos transformados.....	85
Tabla 17: Resumen del modelo de regresión lineal para Ozono.....	85
Tabla 18: Estadísticos del modelo.....	86
Tabla 19: Evaluación del modelo de regresión lineal.....	86
Tabla 20: Promedio anual estaciones monitoreadas por (II) durante el 2022.....	87
Tabla 21: Resumen estadístico datos 2022 subred de microsensores (I).....	112

Lista de abreviaturas y acrónimos

CCA. – Estación Norte ubicado en la Unidad Educativa “Juan Montalvo”

CEB. – Estación cebollar ubicado en la Planta de Tratamiento de Agua Potable “El Cebollar”

CO. – Monóxido de Carbono

CON. – Estación “La Condamine” (subida al vado)

CV_(k). – Promedio del error de prueba de k estimaciones

EIE. – Estación Sur ubicado en la Escuela “Ignacio Escandón”

EMOV – EP. – Empresa Pública de Movilidad, Transporte y Tránsito de Cuenca.

EPA. – Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

NECA. – Normativa Ecuatoriana de Calidad del Aire

NO₂. – Dióxido de Nitrógeno

MP_{2.5}. – Material Particulado inferior a 2.5 micras

MP₁₀. – Material Particulado inferior a 10 micras

MSE. – Error medio cuadrático

MUN. – Estación Municipal (edificio de la alcaldía de Cuenca, centro de la ciudad)

OMS. – Organización Mundial de la Salud

O₃. – Ozono troposférico

RM. – Red de Monitoreo

RMSE. – Raíz del error medio cuadrático

SO₂. – Dióxido de azufre

TET. – Estación terminal terrestre de la ciudad

p_value. – Valor de significancia estadística

Dedicatoria

Con mucha alegría y satisfacción, me complace dedicar el presente trabajo de titulación a mis queridos padres. Ellos, con sacrificio, responsabilidad y amor, me brindaron su apoyo en todos los momentos de mi vida. En este mismo sentido, quiero dedicar este trabajo a mi querida enamorada, Anita, quien me ha acompañado en las dificultades y alegrías durante mi período universitario, y ha sido una inspiración de sacrificio y ejemplo frente a las adversidades.

También es imperioso reconocer y dedicar este trabajo a todos mis familiares, quienes supieron apoyarme con palabras de aliento y sabiduría durante todo este proceso. Finalmente, pero no menos importante, deseo dedicar el éxito de este trabajo a mi querida abuelita, quien ha sido una madre para mí en cada paso de mi vida. Con su amor incondicional, siempre estuvo apoyándome en todo momento y forjando mi carácter para la vida.

Agradecimientos

Estimados lectores, a través de este espacio, me complace expresar mi más profundo agradecimiento y gratitud a la Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. El departamento de Calidad del Aire, liderado por la Ing. Claudia Espinoza, y sus analistas, los ingenieros Cristian Caguana y Emilio Heredia, me han brindado su guía con experiencia y profesionalismo durante estos últimos meses.

De igual manera, agradezco a mi tutor de tesis, el Ing. Rubén Jerves, cuya ayuda fue fundamental para realizar con éxito mi trabajo de titulación. Asimismo, quiero reconocer y agradecer a cada uno de los docentes de la Universidad de Cuenca, quienes, con su ejemplo y sabiduría, me han guiado durante mi periodo como estudiante.

Finalmente, doy gracias a Dios por darme la sabiduría e inteligencia necesarias para afrontar las dificultades de la vida. En el mismo sentido, quiero expresar mi agradecimiento a mis amigos y compañeros de estudio Mateo, Brian, Bernarda, Janela y Karen. Junto a ellos, compartimos muchos momentos de alegrías y tristezas en las aulas de la Universidad, además de forjar una linda amistad.

Por último, deseo extender mi gratitud a todas las personas que me apoyaron con palabras de aliento y sabiduría para la materialización de este trabajo de titulación, especialmente a la Sra. Elizabeth y el Ing. Néstor Asmal. Sus aportes fueron valiosos y significativos en este proceso.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados en 2015 por las Naciones Unidas, exponen la importancia de conocer los niveles de contaminación atmosférica, con el fin de evidenciar sus efectos en la salud pública y disminuirlos; mediante la adopción de políticas y acciones que permitan mejorar la calidad ambiental.

El principal antecedente previo a la implementación de la red de microsensores en la ciudad de Cuenca, fue la Red de Monitoreo (RM) de la Calidad del Aire que opera desde el año 2008, la cual comprendió en primera instancia con una subred pasiva de muestreo de contaminantes gaseosos y que cuenta con 20 estaciones distribuidas en la ciudad. Consecuentemente, en el año 2012 entra en funcionamiento la estación automática de monitoreo de calidad del aire (MUN), donde se registra en tiempo real las concentraciones de CO, SO₂, NO₂, O₃ y material particulado MP_{2.5} y MP₁₀. Así también, desde junio del 2016 opera un equipo automático para medir partículas finas (MP_{2.5}) localizado en la escuela Juan Montalvo (CCA), que monitorea la zona de influencia del parque industrial.

De igual manera, otro equipo automático de MP_{2.5} ubicado en la zona sur de la ciudad que opera desde junio del 2020. Además de la presencia de dos analizadores automáticos referenciados por la EPA para los contaminantes criterio como CO y SO₂ en la misma estación (EIE). Finalmente, una subred activa de material particulado MP₁₀, conformada por 3 equipos semiautomáticos de alto volumen, equipos que se encuentran ubicados en el norte (CCA), centro (MUN) y sur (EIE) de la ciudad (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021). Los sensores automáticos, en complemento con las subredes operativas desde el año 2008; permiten a la RM de la EMOV – EP, cumplir con los requisitos que establece la Legislación Nacional, enmarcada en el Anexo IV del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

1.2. Problemática

En el contexto global, la Organización Mundial de la Salud (OMS) enmarca a la contaminación atmosférica como un riesgo medioambiental para la salud pública, donde se vincula que el deterioro de la calidad del aire en ciudades en crecimiento poblacional y de superficie, está relacionado con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer de pulmón, entre otras que afecten directa o indirectamente a grupos sensibles.

Por otra parte, en el contexto local las emisiones de contaminantes criterio, como: dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozono O_3 y material particulado MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$; en la zona urbana del cantón Cuenca, son producto del tráfico vehicular. Ya que tiene mayor influencia en la contaminación del aire ambiente a nivel urbano, esto de acuerdo al último inventario de emisiones, elaborado con año base 2014 (EMOV - EP, 2016), donde mencionan que las fuentes más importantes por contaminantes primarios son las siguientes:

- Monóxido de carbono (CO): tráfico vehicular 94.5%.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): tráfico vehicular 71.2 %, térmicas 18.5 %.
- Compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVNM): tráfico vehicular 39.6 %, uso de disolventes 29.7 % vegetación 19.5 %.
- Dióxido de azufre (SO_2): industrias 60.4 %, térmicas 35.1 %.
- Material particulado fino ($\text{MP}_{2.5}$): tráfico vehicular 42.5 %, ladrilleras artesanales 38.5 %, térmicas 11.3 %.
- Material Particulado (MP_{10}): tráfico vehicular 55.6 %, ladrilleras artesanales 24.6 %.

(EMOV - EP, 2016)

Parte de la problemática local es el aumento exponencial del parque automotor, ya que, según datos de la Revisión Técnica Vehicular (RTV), y conforme lo menciona el Informe de Calidad del Aire, (2021), a la RTV se presentaron 90 715 vehículos en el año 2021.

Por ende, la Red de Monitoreo, (2021) menciona que esta cantidad es mayor al número de vehículos que se presentaron en los años 2017 hasta 2020, aunque menor a los números desde 2012 hasta 2016. Añadido a esto, las emisiones del parque industrial generadas al noroccidente de la ciudad tienen gran repercusión en la contaminación atmosférica local, como fuente puntual de contaminación.

1.3. Justificación

La EMOV – EP preocupados por la necesidad de contribuir a las inquietudes de los ciudadanos sobre la influencia que tiene la contaminación atmosférica en la calidad de vida de las personas, recurrió a la implementación de una Red de Monitoreo de calidad del aire, utilizando varias metodologías entre ellas los microsensors. Los cuales monitorean las concentraciones de seis contaminantes atmosféricos en seis puntos de la ciudad estos contaminantes son: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3), y material particulado MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$, MP_1 . Estos contaminantes se conocen

como contaminantes criterio y se encuentran regulados por la normativa nacional vigente en el Libro VI Anexo IV del Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULSMA).

El desarrollo del presente trabajo de titulación permitirá sugerir a la EMOV – EP el análisis de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca, mediante las herramientas estadísticas del paquete “Openair” de RStudio; como alternativa metodológica para el análisis de la contaminación atmosférica. De igual manera, la información generada servirá para contrarrestar la buena o mala calidad del aire, en una determinada área; ya sea por el uso de suelo, fuentes puntuales, tráfico vehicular o densidad de población, esto es clave para entender la problemática de contaminación en la ciudad.

Por otra parte, enmarcados a los criterios estipulados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), se asume la importancia de evaluar la calidad del aire a escala urbana, donde la medición refleja la mezcla de contaminantes de diferentes fuentes dentro de un complejo urbano. Al mismo tiempo el impacto a escala vecinal para la localidad de cada estación monitoreada por microsensores en el área urbana. Dicho esto, el presente estudio sirve para analizar la calidad del aire en la ciudad de Cuenca durante el 2022, con los datos del primer año de monitoreo y transmisión de la red de microsensores.

En este sentido, parte del trabajo tiene como énfasis evaluar la relación entre metodologías de monitoreo, donde se espera generar un modelo de regresión lineal o de ajuste de datos para los valores registrados por los microsensores al valor generado por los analizadores referenciados, para aquellos parámetros que tengan una relación positiva fuerte. La realización de este modelo viene dada por la necesidad de no perder información o tener una falta de cobertura de datos, para la generación del informe anual de calidad del aire, los cuales son obtenidos de los analizadores automáticos.

La importancia de este trabajo se centra en generar información relevante que sirva de apoyo a la RM de la EMOV – EP, dentro del análisis de calidad del aire en la ciudad de Cuenca. Por medio del software RStudio y el paquete “Openair”, mismos que son de libre acceso, además de confirmar el uso de sensores de bajo costo como una tecnología que la Unión Europea la recomienda como indicativa (Envea, 2019).

En síntesis, el presente trabajo sirve como línea base para validar el uso de microsensores en otras aplicaciones como: ciudades con altos niveles de contaminación atmosférica; monitorear la calidad del aire interior en espacios cerrados; gestionar el tráfico vehicular entre otras aplicaciones, donde la toma de decisiones por las autoridades se enfoque en la gestión de la salud pública.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo General*

- Analizar la calidad del aire mediante la aplicación de microsensores por medio de herramientas estadísticas para la ciudad de Cuenca.

1.4.2. *Objetivos Específicos*

- Establecer la relación espacio temporal entre las variables ambientales y la calidad del aire.
- Construir un modelo de ajuste para material particulado $MP_{2.5}$ que sirva de apoyo a la red de calidad del aire con base en la información registrada por la red de microsensores.
- Comparar los valores registrados de contaminantes frente a la normativa nacional y a las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.

Capítulo 2

2. Fundamento teórico

2.1. *Atmósfera y aire ambiente*

La atmósfera comprende una capa gaseosa compuesta por nitrógeno (N_2) y Oxígeno (O_2) y otros gases como vapor de agua y dióxido de carbono (CO_2); los primeros 30 km desde la superficie comprende casi el 100 % de la totalidad de su masa (Camilloni, 2005). Mientras que el aire ambiente es aquella porción no confinada de la atmósfera, cuya composición normal es 79 % nitrógeno, 20 % oxígeno, 1 % dióxido de carbono y en proporciones mínimas tanto de gases inertes como vapor de agua (TULSMA, 2018).

2.2. *Emisión e inmisión*

La emisión en relación con la calidad del aire, hace referencia a la liberación de compuestos que contaminan el ambiente atmosférico, como consecuencia de acciones llevadas a cabo por el ser humano o por procesos naturales. La emisión se define como "la descarga de contaminantes desde una fuente identificable a la atmósfera, el agua o el suelo" (Environmental Protection Agency, 2023).

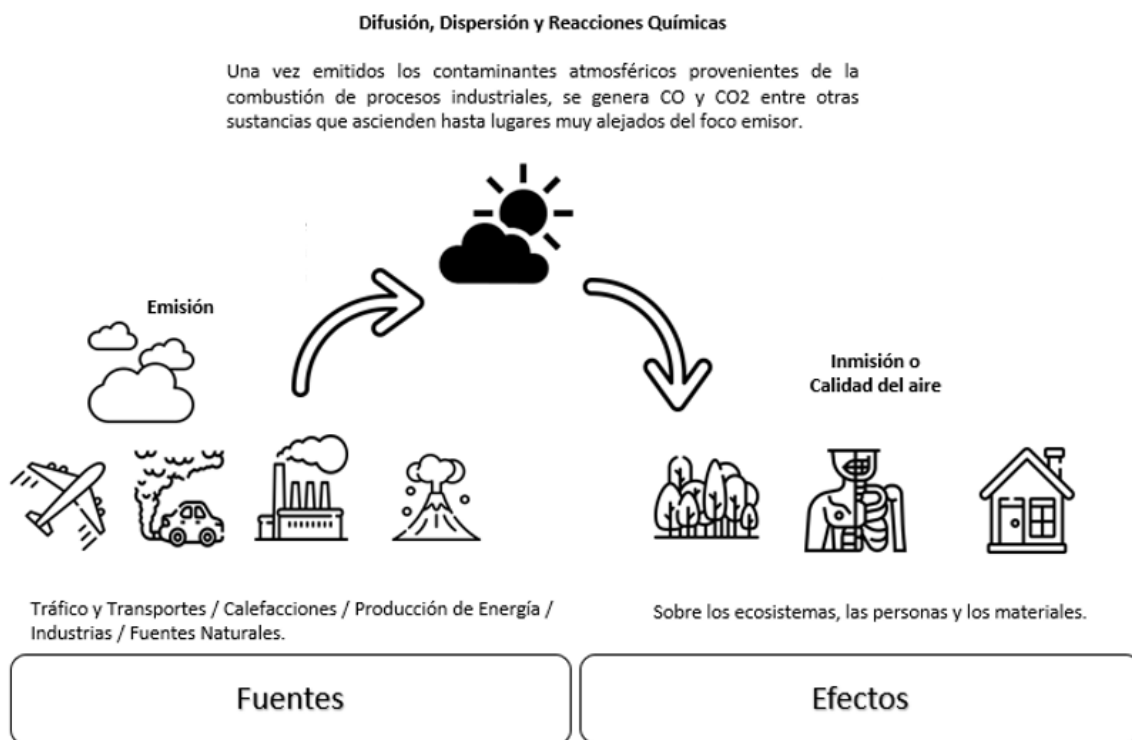
No obstante, la calidad del aire y niveles de inmisión es la concentración de contaminantes en un punto determinado como consecuencia de emisiones, así como de fenómenos de dispersión y reacciones atmosféricas (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2020). La Figura 1 muestra la interacción de las fuentes y los efectos de los mismos en términos de calidad del aire.

2.3. Contaminación del aire

Este problema ambiental resulta de actividades antropogénicas o de procesos naturales, que emiten sustancias contaminantes a la atmósfera, tales que, afectan la salud, el bienestar y el confort de los seres vivos y el ambiente (COSUDE & Ministerio del Ambiente, 2010).

Figura 1:

Esquema de contaminación atmosférica



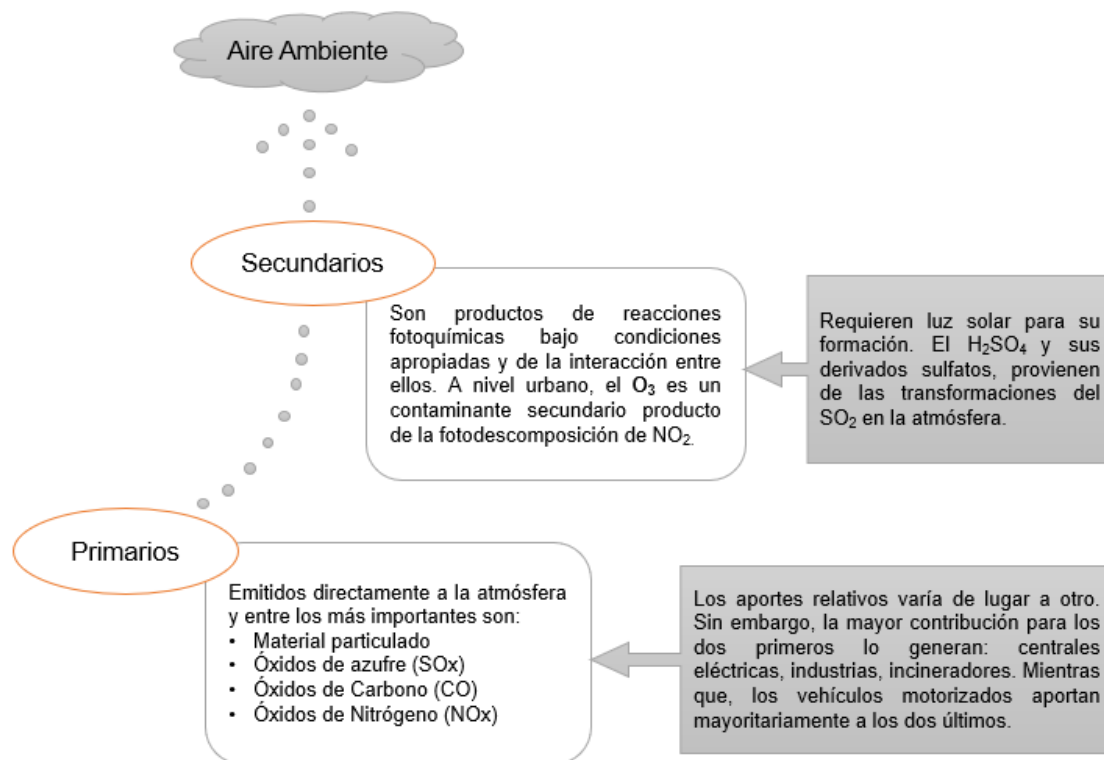
Nota: La figura esquematiza las fuentes y causas de la contaminación atmosférica. Adaptado del *Informe de Calidad del Aire 2020*, (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2020).

2.4. Contaminantes primarios y secundarios

La clasificación general de los contaminantes atmosféricos comprende categorizarlos en dos instancias: contaminantes primarios y contaminantes secundarios. La Figura 2 a continuación, explica su procedencia.

Figura 2:

Clasificación de los contaminantes



Nota. Adaptado de *Contaminación Atmosférica de Santiago* (p.27), por Sandoval et al., 1993, Universidad de Chile.

2.5. Contaminantes criterio del aire

Todo aquel contaminante atmosférico que conste en el Anexo 4 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), el cual norma la calidad del aire ambiente o nivel de inmisión, donde se especifica un valor máximo de concentración permitido a nivel de suelo para diferentes períodos de tiempo (TULSMA, 2018).

Esta norma establece a los siguientes contaminantes como criterio: partículas sedimentables (PS), material particulado (MP₁₀ y MP_{2.5}), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃) (TULSMA, 2018). A continuación, se describe el concepto y fundamento científico expuesto por la Agencia de Protección Medio Ambiental de los Estados Unidos (EPA), para cada contaminante.

2.5.1. Monóxido de carbono (CO)

La contaminación por monóxido de carbono en el aire exterior se explica por la EPA (2022), donde se afirma que la mayor fuente de contribución al aire ambiente son por los automóviles, camiones y maquinaria que queman combustibles fósiles.

El CO es un gas incoloro que puede ser dañino cuando se inhala en altas concentraciones, incluso puede ser mortal en cortos periodos de tiempo. Mientras que, para afectar la calidad del aire interior, este gas puede ser liberado por calentadores de queroseno, chimeneas, hornos y estufas con fugas de gas (United States Environmental Protection Agency, 2022a).

2.5.2. Ozono (O₃)

Según la EPA, 2022; el ozono se puede encontrar tanto a nivel del suelo como en la estratosfera de la Tierra y está químicamente compuesto por tres átomos de oxígeno. Cuando se encuentra a nivel del suelo, el ozono es llamado troposférico y se convierte en un contaminante nocivo del aire que afecta tanto al ambiente como a las personas (United States Environmental Protection Agency, 2022b).

Este contaminante es causado principalmente por las reacciones químicas de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV's). Además, se señala que el ozono es más dañino para la salud en días calurosos y de alta radiación solar (United States Environmental Protection Agency, 2022b).

2.5.3. Dióxido de azufre (SO₂)

La normativa estadounidense por medio de la EPA regula la exposición a todo grupo de óxidos de azufre (SO_x); por ende, la EPA señala al SO₂ como el contaminante gaseoso de mayor preocupación dentro de este grupo.

Además, se señala que la principal fuente de contaminación de este gas en el aire ambiente es debido a la combustión de combustibles fósiles en las centrales eléctricas entre otras industrias; mientras que en menor contribución es debido a la extracción de metales del mineral; fuentes naturales como volcanes, y cualquier maquinaria que queme combustible con alto contenido de azufre (United States Environmental Protection Agency, 2022e).

2.5.4. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) es un grupo de gases altamente reactivos, siendo el NO₂ el mejor indicador de contaminación por este grupo de contaminantes gaseosos. El NO₂ entra

al aire fundamentalmente por la quema de combustible, debido a las emisiones de automóviles, camiones, autobuses y centrales eléctricas. Según la EPA (2022) el NO_2 es uno de los causantes de lluvia ácida, puesto que al reaccionar con el vapor de agua produciría ácido nítrico (United States Environmental Protection Agency, 2022c).

De igual manera el NO_2 da lugar a varias reacciones químicas en la atmósfera, producto de ello se da lugar a la producción de ozono troposférico (United States Environmental Protection Agency, 2022c).

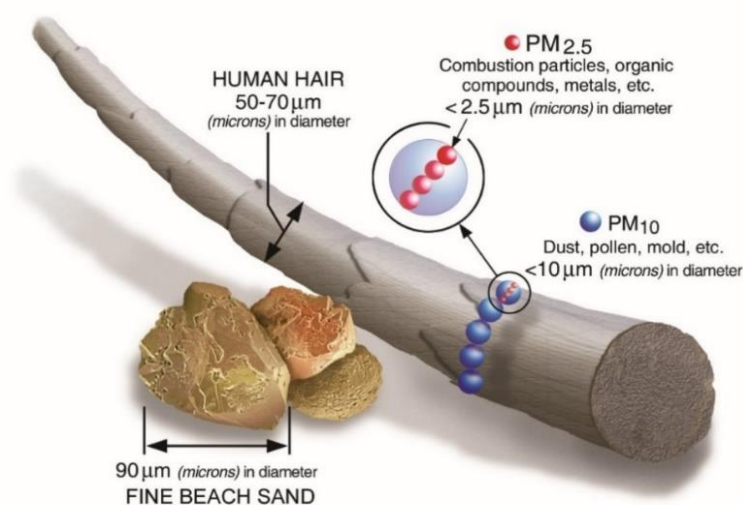
2.5.5. Material particulado (MP_{10}) y ($\text{MP}_{2.5}$)

La contaminación por partículas, según lo indicado por la EPA se refiere a una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire. Esta contaminación se la puede ver en el polvo, el hollín o el humo. Esta contaminación se puede clasificar de dos maneras dado sus diferentes tamaños, aquellas con diámetro de 10 micrómetros y menores puede ser partículas inhalables MP_{10} ; mientras que todas aquellas que son de 2,5 micrómetros de diámetro o menores, son partículas inhalables finas $\text{MP}_{2.5}$ (United States Environmental Protection Agency, 2022d).

Estas partículas se emiten directamente desde una fuente como: construcciones, caminos sin pavimentar, chimeneas o incendios; también se considera que cientos de productos químicos forman estas partículas (United States Environmental Protection Agency, 2022d). En la Figura 3 se pueden diferenciar las dimensiones y equivalencias de las partículas finas.

Figura 3:

Tamaño de partículas



Nota. Tomado de *Pollution of particulate*, por EPA, 2022, (<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>).

2.6. Contaminantes del aire exterior: Fuentes y Efectos

La Tabla 1 muestra las principales fuentes de contaminación y sus efectos tanto a la salud pública como al ambiente en general, la información respecto a las fuentes y efectos en el ambiente fue recopilada de la página oficial de la EPA en su última actualización del 14 de junio del 2022, mientras que los efectos en la salud pública se obtuvieron del estudio realizado por Espinoza y Palacios, (2014) sobre los posibles efectos de la contaminación del aire exterior.

Tabla 1:

Principales efectos y fuentes de emisión

Contaminantes	Fuente de Emisión	Efectos en la salud pública	Efectos en el Ambiente
Ozono	La emisión de automóviles, centrales eléctricas, calderas industriales, refinerías, plantas químicas entre otras.	El organismo se ve afectado en la función respiratoria, bronquitis y crisis de asma, además de sequedad en la garganta y constantes cefaleas.	El ozono troposférico puede afectar la vegetación sensible durante el crecimiento.
Óxidos de azufre	La principal fuente es la combustión de combustibles fósiles en las centrales eléctricas y de vehículos con alto contenido de azufre en la gasolina. Además, de procesos naturales como la actividad volcánica.	Principalmente irrita las vías respiratorias superiores. Además de ocasionar broncoconstricción en pacientes con asma, durante el ejercicio diario.	En altas concentraciones puede llegar a afectar el follaje y disminuir el crecimiento en plantas. Además de ser un fuerte contribuidor de lluvia ácida lo cual daña ecosistemas sensibles.

Óxidos de nitrógeno	de	<p>En ambientes interiores puede provocarse por estufas, hornos, chimeneas. Al exterior la principal fuente de emisión son los vehículos.</p>	<p>Ocasiona cambios en el bronquiolo terminal y lesiones alveolares difusas, además de haber una mayor incidencia de asma.</p>	<p>Los óxidos de nitrógeno llegan a formar lluvia ácida, lo que causa daños severos en ecosistemas sensibles como bosques, ríos y lagos. Además, puede provocar contaminación por la elevada concentración de nutrientes en aguas costeras.</p>
Monóxido de carbono	de	<p>Fundamentalmente todo equipo que tenga un motor de explosión, además de hornos y calentadores domésticos.</p>	<p>Problemas respiratorios por intoxicación aguda asfixia y muerte; en una intoxicación crónica se contrae síntomas respiratorios y cefaleas.</p>	<p>Puede reducir la cantidad de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua, puede intervenir en la fotosíntesis afectando el crecimiento de las plantas.</p>
Partículas finas menores a 2.5 micras.		<p>Las fuentes fijas como construcciones, aserraderos, campos, chimeneas, caminos sin pavimentar entre otras industrias que liberan material particulado a la atmósfera.</p> <p>La principal fuente móvil de mayor contribución de</p>	<p>Estas partículas penetran aún más las vías respiratorias, por lo que causa efectos adversos en la salud más graves.</p>	<p>Estas partículas son la causa principal de la visibilidad producto de la neblina. La dispersión de estas partículas alcanza grandes distancias por lo cual puede asentarse en el suelo o el agua y dañar el biotopo, dependiendo su composición química.</p>

Partículas finas menores a 10 micras.	estas partículas son los vehículos.	
	Además de las mencionadas, también se forman como resultado de reacciones complejas de sustancias químicas como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno.	Puede agravar los síntomas de asma y las enfermedades respiratorias agudas.

Nota. Adaptado de *Criteria Air Pollutants*, por EPA, 2022 & *Contaminación del aire exterior. Cuenca - Ecuador, 2009- 2013, posibles efectos en la salud*, por Espinoza y Palacios, 2014.

2.7. Escala de monitoreo

El alcance espacial está definido por escalas de representatividad o cobertura establecidas por la EPA (PART 58 - AMBIENT AIR QUALITY SURVEILLANCE, 2006). La Tabla 2 muestra en síntesis la representatividad de cada una de las escalas de monitoreo, como lo corrobora el estudio realizado por Jerves Cobo y Armijos Arcos, (2016).

Tabla 2:

Escalas de monitoreo espacial

Escala	Representación Espacial
Micro – escala	Área de 0 a 100 metros a la redonda.
Media	Área desde 100 m hasta 0,5 km.
Vecinal	Usos de suelo uniforme, área desde 0,5 km a 4 km a la redonda.
Urbana	Áreas desde 4 km hasta 50 km dentro de una ciudad.
Regional	Áreas rurales con características geográficas similares, sin grandes fuentes de emisión y que se extiende

de decenas a centenas de
kilómetros.

Nota. Adaptado de “Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca—Ecuador” (p. 2), por Jerves Cobo y Armijos Arcos, 2016, *La Granja*.

2.8. Red de microsensores o sensores de bajo costo

Los sensores electroquímicos son una opción tecnológica viable para medir gases inorgánicos para el control de la calidad del aire a niveles muy bajos que son de 2 a 3 ppb órdenes de magnitud, así como los contadores ópticos para partículas tienen resultados prometedores (Penza, 2020). En este contexto, la red de microsensores que de ahora en adelante será llamada “subred” por lo dispuesto en la EMOV – EP. Se enmarca en la necesidad de monitorear la calidad del aire en zonas de alto flujo vehicular en la ciudad de Cuenca utilizando microsensores de bajo costo. Los sensores están integrados a una estación compacta y el monitoreo se realiza en tiempo real y de manera continua. La información es transmitida directamente a los servidores de la EMOV – EP, por comunicación de red celular y son de dominio público.

2.8.1. Composición de una estación de microsensores

Cada una de las seis estaciones de microsensores que conforman la subred, están compuestas de los siguientes ítems; al igual como se observa en la Figura 4: sensor de monóxido de carbono (CO), sensor de dióxido de azufre (SO₂), sensor de dióxido de nitrógeno (NO₂), sensor de ozono troposférico (O₃), sensor simultáneo de material particulado (MP₁₀, MP_{2.5} y MP₁), datalogger IQ-Link, baterías, panel solar, trípode y gabinete de protección “Waterproof” (Envea, 2019).

Figura 4:

Ítems que conforman la estación CON subred de microsensores

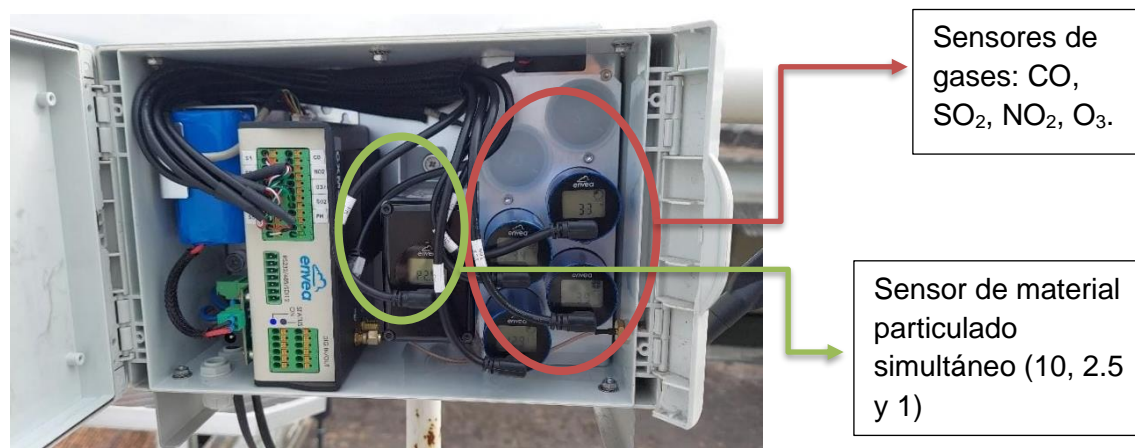


Nota. La fotografía fue tomada por el autor el 01 de abril del 2023.

La Figura 5 muestra el interior del gabinete de protección donde se encuentran los sensores de gases y el sensor simultáneo de material particulado.

Figura 5:

Sensores de bajo costo al interior del gabinete de protección



Nota. La fotografía fue tomada por el autor el 01 de abril del 2023.

Los sensores de bajo costo pueden ser: sensores que miden la concentración de gases y vapores y sensores que miden concentración de masa de partículas finas y gruesas. Cada sensor consta de los siguientes elementos básicos: a) material activo absorbente para especies gaseosas dispersas en el aire, b) un transductor que convierte la respuesta del sensor en señal eléctrica y d) una batería o conector de energía (Penza, 2020).

La mayoría de sensores de bajo costo ofertados en el mercado, se fundamentan por dos principios de transducción (Penza, 2020):

- Sensores ópticos: longitud de onda infrarroja, absorción de luz visible o quimioluminiscencia; mientras que la masa de partículas puede ser medida por cambios de frecuencia en un aparato oscilante y por dispersión de luz donde relaciona el tamaño y la concentración de masa a medir (Penza, 2020).
- Sensores electroquímicos: por interacción química (absorbentes) y el gas monitoreado (Penza, 2020).

De esta manera el método utilizado por la subred de microsensores se sustenta en primera instancia por sensores electroquímicos para el monitoreo de gases; mientras que el sensor óptico se basa en el método de dispersión de luz láser para la medición de la concentración de partículas (Envea, 2019).

2.9. Información meteorológica

Un componente esencial del análisis de calidad del aire a escala urbana, es comprender el transporte y dispersión de los contaminantes, mediante la medición y registro de las variables meteorológicas. De esta manera se resalta las variables meteorológicas como la dirección y velocidad del viento, la variación de la temperatura, la precipitación, radiación solar, humedad relativa y absoluta; entre otras (Instituto Nacional de Tecnología y Cambio Climático, 2023).

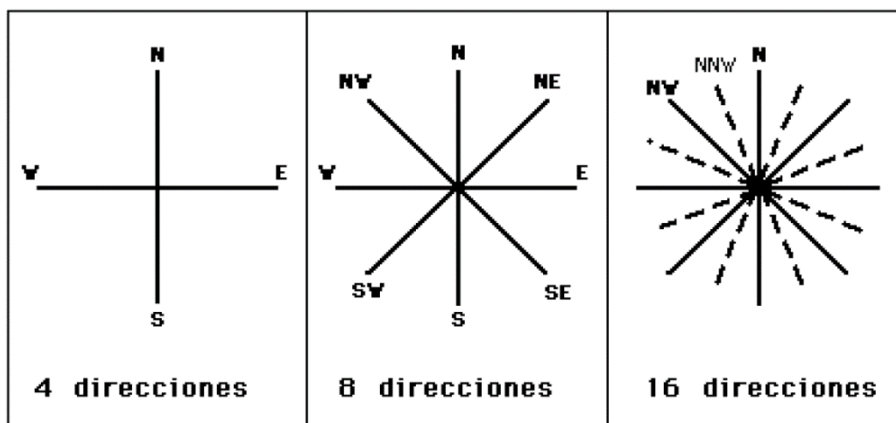
El presente trabajo de titulación tiene mayor énfasis en la variable viento, por ende, este se define como un desplazamiento de aire predominantemente en el eje horizontal provocado por la diferencia de presión de un lugar a otro, su monitoreo se basa en la dirección y velocidad de donde proviene el mismo (Rodríguez & León, 2012).

La Organización Mundial de Meteorología (OMM) establece que la dirección del viento debe indicarse en grados a partir del Norte geográfico y en el sentido de las agujas del reloj, por otra parte, la velocidad puede registrarse en unidades referentes al Sistema Internacional que

mide en m/s. Los aparatos para estas mediciones pueden ser la veleta para la dirección y el anemómetro para la velocidad (Rodríguez & León, 2012).

Figura 6:

Dirección del viento



Nota. Tomado de *Fundamentos de climatología* (p.32), por Rodríguez y León, 2012, Servicio de Publicaciones, Universidad de La Rioja. La dirección del viento se refiere a los distintos rumbos de la rosa de los vientos, esta se nombra indicando el primer nombre más simple y después el más complejo.

Es importante recalcar que el análisis referente en este estudio, hace mención a vientos generados en la superficie terrestre que están más relacionados a condiciones locales del clima y con la topografía del terreno. Además, en función de las ocho direcciones de viento principales, las cuales se muestran a continuación:

Tabla 3:

Términos para la dirección del viento

Término	Dirección
Norte – N	$337,5 \geq N < 22,5$
Noreste – NE	$22,5 \geq NE < 67,5$
Este – E	$67,5 \geq E < 112,5$
Sureste – SE	$112,5 \geq SE < 157,5$
Sur – S	$157,5 \geq S < 202,5$
Suroeste – SO	$202,5 \geq SO < 247,5$
Oeste – O	$247,5 \geq O < 292,5$
Noroeste – NO	$292,5 \geq NO < 337,5$

Nota. Elaboración propia.

2.10. Norma Ecuatoriana de calidad del aire

Por medio del Decreto Ejecutivo No. 3516, publicado en el Registro Oficial Edición Especial 2, el 31 de marzo de 2003. Se expidió el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2018); cuya última modificación tiene fecha 5 de septiembre de 2018. Este reglamento de ley emitido por la Presidencia de la República y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica actualmente, contemplan las normas técnicas que regulan varios parámetros ambientales en el país.

Por consiguiente, el Acuerdo Ministerial No. 097 – A, acuerda expedir el Anexo 4, referente a la Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión (NECA), siendo de aplicación obligatoria en todo el territorio nacional (Acuerdo Ministerial No. 097 - A, 2011).

Tabla 4:

Resumen de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire NECA (2011)

Contaminante	Norma Vigente
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Promedio anual: 40 µg/m ³ Promedio máximo en 1 hora: 200 µg/m ³
Dióxido de azufre (SO ₂)	Promedio en 24 horas: 125 µg/m ³ Promedio anual: 60 µg/m ³ Promedio en 10 minutos: 500 µg/m ³
Partículas sedimentables (PS)	1 mg/cm ² durante 30 días
Material particulado con diámetros menos 10 µm (MP ₁₀)	Promedio anual 50 µg/m ³ Promedio en 24 horas: 100 µg/m ³
Material particulado con diámetros menos 2.5 µm (MP _{2.5})	Promedio anual: 15 µg/m ³ Promedio en 24 horas: 50 µg/m ³
Monóxido de carbono (CO)	Promedio máximo en 8 horas: 10 000 µg/m ³ Promedio máximo en 1 hora: 30 000 µg/m ³
Ozono (O ₃)	Promedio en 8 horas: 100 µg/m ³

Nota. Tomado del Informe de Calidad del Aire 2021, (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021)

2.11. Guías de la OMS de 2005 y la actualización mundial 2021

Los valores de calidad de aire de la OMS son altamente exigentes, dado que se fundamentan en información tomada de la literatura científica más actualizada sobre los efectos de los

contaminantes en la salud pública (Organización Mundial de la Salud, 2021). Estos valores se consideran como una referencia global para el ámbito de calidad ambiental. Los cuales ofrecen recomendaciones relativas a la salud para la gestión de la calidad del aire. La Tabla 5 proporciona un resumen comparativo entre los valores guía de la OMS y la NECA. Cabe mencionar que los valores cuantitativos expuestos hacen referencia a la media aritmética calculado para todas las muestras posibles en el lapso de tiempo indicado, tanto como en el corto plazo como a largo plazo.

Tabla 5:

Comparación de la NECA con los valores guía de la OMS 2005 y 2021

Contaminante	NCAA µg/m³	OMS 2005 µg/m³	OMS 2021 µg/m³
MP _{2.5} (24 h)	50	25 ^a	15
MP _{2.5} (anual)	15	10	5
MP ₁₀ (24 h)	100	50 ^a	45
MP ₁₀ (anual)	50	20	15
SO ₂ (10 min)	500	500	500
SO ₂ (24 h)	125	20	40
SO ₂ (anual)	60		
CO (15 min)			100 000
CO (1 h)	30		35 000
	000		
CO (8 h)	10		10 000
	000		
CO (24 h)			4 ^a
O ₃ (8 h)	100	100*	100 ^a
O ₃ (8 h)			60*
NO ₂ (24 h)			25 ^a
NO ₂ (1 h)	200	200	
NO ₂ (anual)	40	40	10

Nota. Adaptado de Informe de Calidad del Aire 2021, (EMOV – EP, 2021). Se debe considerar el * Promedio de las concentraciones máximas diarias en 8 horas, en los seis meses con el máximo valor. ^a Percentil 99 (es decir, 3 a 4 días de superación por año).

2.12. Umbral de datos válidos

Por otra parte, la EPA enmarca un umbral de datos validos si se dispone como mínimo el 75 % de datos completos en un periodo de muestreo determinado (PART 50 - NATIONAL PRIMARY AND SECONDARY AMBIENT AIR QUALITY STANDARDS, 2006), para el caso práctico de esta tesis el lapso de tiempo a considerar es de un año, considerando valores horarios, para los diferentes contaminantes criterio y parámetros meteorológicos. Siendo el

100 % de datos válidos para aquellos parámetros que cuentan con una cantidad igual a 8 760 valores medidos, respecto a la sumatoria de los valores horarios durante el 2022. Con el mínimo de datos válidos, se garantiza que la data registrada sea confiable y representativa, para el análisis de la calidad del aire.

2.13. Openair un paquete de RStudio

El paquete “Openair” de RStudio, proporciona funciones para analizar y comprender los datos de contaminación del aire en un entorno gratuito y de código abierto (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012). La iniciativa de esta metodología de análisis fue empleada en principio por Reino Unido, en donde estudios resaltan las principales funciones y aspectos de análisis que tiene el paquete, mismos que se describen a continuación:

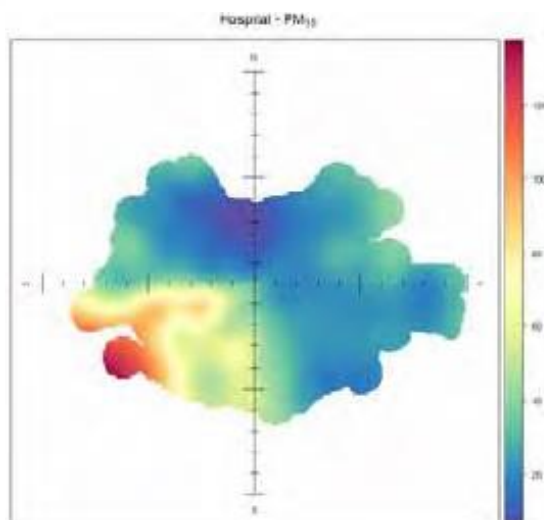
La rosa de los vientos generada por la función “windRose” sirve para mostrar de manera resumida los datos meteorológicos, donde se resume la frecuencia de los valores de velocidad y dirección del viento en Reino Unido (Kent & David, 2009).

El análisis principal de esta tesis comprende los gráficos polares bivariados que según su metodología indican la variación de las concentraciones de un contaminante en función de la velocidad y dirección del viento (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012). Los resultados de estos gráficos se calculan mediante técnicas de suavizado estadístico con la intención de mostrar una superficie continua.

La estación se ubica en el origen del gráfico, mientras que la distancia desde el origen indica la velocidad del viento. Las concentraciones elevadas según la escala y a distancias lejanas del origen, indican altas velocidades de viento cuando fueron monitoreados, para el ejemplo de este análisis se toma la Figura 7. De igual manera, Carslaw et al., (2012), establece que, en situaciones urbanas, los diagramas polares bivariados han demostrado ser útiles para comprender las complejidades de la dispersión en los cañones de las calles y alrededor de cruces.

Figura 7:

Gráfica polar bivariado para MP_{10} estación AURN de Port Talbot año 2000



Nota. Tomado de “An Independent Review of Monitoring Measures Undertaken in Neath Port Talbot in Respect of Particulate Matter (PM10)” (p.77), por Hayes, 2009.

El autor concluye mediante el gráfico que las concentraciones más altas de MP_{10} se monitorearon bajo condiciones de viento del suroeste, resaltando aquellas concentraciones más altas a velocidades de viento medias o altas. Lo que podría deberse según el autor a que las fuentes predominantes no se encuentran en las proximidades de la estación y es muy probable que las concentraciones de MP_{10} estén relacionadas con fuentes donde la dispersión de sus contaminantes se vea afectada por la velocidad del viento.

Las gráficas referentes a las variaciones temporales de los contaminantes criterio sirven para analizar cómo cambian estos a lo largo del tiempo identificando tendencias y patrones en su comportamiento. No obstante, analizar esta variación en un lugar específico a diferentes escalas de tiempo pueden revelar información sobre fuentes probables de contaminación, como ejemplo en la investigación de Carslaw (2019), menciona que las emisiones de vehículos de carretera tienden a seguir patrones muy regulares a nivel diario como semanal respecto a las concentraciones de monóxido de carbono y dióxido de azufre. Por otra parte, otra forma de representar las tendencias es la generación de mapas de calor los cuales por medio de la función “trendLevel”, sirve para graficar el valor medio de una variable (concentración) frente a dos variables categóricas (hora del día – mes o dirección del viento – mes) (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012).

2.14. Estadística descriptiva

En términos simples, analizar descriptivamente los datos ambientales implica clasificar, explicar y simplificar la información recolectada. Se pueden usar varias métricas estadísticas para resumir la información, como las medidas de centralización que indican donde se

ubicaría el centro de los datos, las medidas de dispersión para indicar cuánto se alejan los datos del centro, y las medidas de deformación o apuntamiento para representar la simetría y concentración de los datos alrededor de su valor central. La selección de la medida estadística adecuada dependerá del propósito del análisis y del tipo de datos estudiados (Gorgas García et al., 2011).

2.15. Pruebas de normalidad

Realizar una prueba de bondad de ajuste implica un análisis previo de la normalidad, en consecuencia, para poder aplicar diferentes test estadísticos. Por ende, para probar la hipótesis de que una distribución de frecuencias observada se ajusta alguna distribución afirmada. El test de Lilliefors se basa en el test de Kolmogorov – Smirnov y se utiliza para probar la hipótesis nula de que los datos provienen de una población con una distribución normal, esta prueba lleva tal nombre en honor a Hubert Lilliefors, su diferencia radica en no asumir la media y la desviación estándar como conocidos (Lilliefors, 1967).

2.16. Correlación de “Spearman”

El coeficiente de correlación de rangos de Spearman es frecuentemente utilizado para medir la fuerza y dirección de la relación entre dos variables medidas en escala continua, siendo una técnica estadística no paramétrica la cual no supone ninguna distribución específica de los datos. Asimismo, puede ser usado cuando se tiene valores extremos a diferencia del coeficiente de correlación de “Pearson”, que sí le afecta estos datos (Kottegoda et al., 2008). La siguiente ecuación determina su cálculo:

$$r_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (\text{ecuación 1})$$

En donde n se clasifica por separado, de modo que para cada par de datos x_i y y_i , el valor más alto tiene el rango 1 y el rango n es el del valor más bajo. Por otra parte, d_i , es la diferencia entre los rangos dados a x_i y y_i . El resultado obtenido oscila entre -1 y 1, siendo -1 para una correlación negativa perfecta, 0 para ausencia de correlación y 1 para una correlación positiva perfecta (Kottegoda et al., 2008).

2.17. Transformación “Box – Cox”

La transformación Box – Cox, definida por George Box y Sir David Cox, es una versión escalada de la transformación de Tukey (ecuación 2), y de igual manera esta indexada por λ , a continuación, se presenta ambas transformaciones (Kutner, 2005):

$$y = \begin{cases} x^\lambda & \text{if } \lambda > 0 \\ \log x & \text{if } \lambda = 0 \\ -(x^\lambda) & \text{if } \lambda < 0 \end{cases} \quad (\text{ecuación 2}) \quad x(\lambda) = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{if } \lambda \neq 0 \\ \log x & \text{if } \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{ecuación 3})$$

En ambos casos x es la variable que se desea transformar y λ el parámetro de transformación. En la ecuación 3, propuesta por Box y Cox, λ tiende a cero de esta manera se consigue la continuidad en λ y hace que se incluya la función $\log x$ en la familia de transformaciones (Kutner, 2005). El valor λ es calculado por el método de máxima verosimilitud, el cual consiste en la estimación de un parámetro (λ) o de varios de una población por medio del valor que maximiza a la verosimilitud de una muestra, la ecuación 4 describe su cálculo (Aparicio, s. f.).

$$L(\lambda) = -\frac{n}{2} \log\left(\frac{RSS\lambda}{n}\right) + (\lambda - 1) \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{ecuación 4})$$

La aplicación de esta transformación no lineal tiene dos enfoques; el primero es eliminar la asimetría y mejorar la linealidad de los datos, entre otras características de distribución que complican el análisis de un método estadístico posterior, que en su mayoría es encontrar una transformación simple que conduzca a la normalidad, y el segundo es la transformación a variables en un modelo de regresión lineal (Kutner, 2005). La elección de qué variable transformar depende del problema específico y debe basarse en una comprensión cuidadosa de los datos y del problema que se está abordando.

2.18. Regresión lineal simple

El análisis de regresión se centra en predecir valores de una variable dependiente o de respuesta a partir de los valores de una o más variables independientes o explicativas, usando la información de las variables explicativas x_1, x_2, \dots, x_n , en cuanto se trate solo de una variable “ x ” y una variable “ y ” el análisis de correlación está relacionado con el análisis de regresión, puesto que a mayor correlación más líneas de regresión similares resultaran (Reimann et al., 2008). La suposición inicial de una relación directa está en forma a la ecuación 5.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (\text{ecuación 5})$$

En donde Y es una variable aleatoria observable, x es una variable no aleatoria observable y β_0 y β_1 son parámetros desconocidos, llamados coeficientes de regresión; β_0 es el intercepto en la ecuación y β_1 es la pendiente, además ε es el error de medición, el modelo formula el error para que este sea igual a cero (Kottegoda et al., 2008).

Capítulo 3

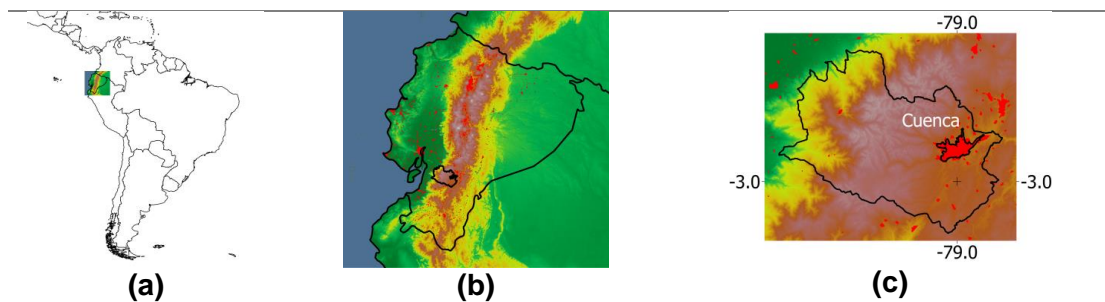
3. Metodología

3.1. Área de estudio

La Tabla 6 muestra la ubicación geográfica de Cuenca en el contexto de Sudamérica; mientras que, la Figura 8 muestra la división parroquial del área urbana del cantón Cuenca.

Tabla 6:

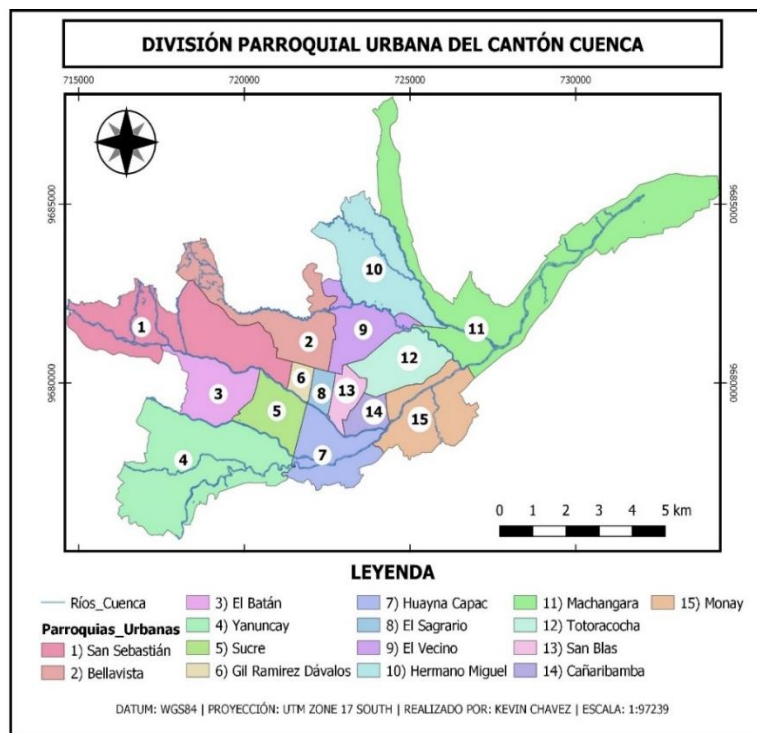
Ubicación del cantón Cuenca - Ecuador en Sudamérica



Nota. Tomado del Informe de Calidad del Aire (2021). A) Sudamérica B) Ecuador C) Cantón Cuenca.

Figura 8:

División parroquial urbana del cantón Cuenca



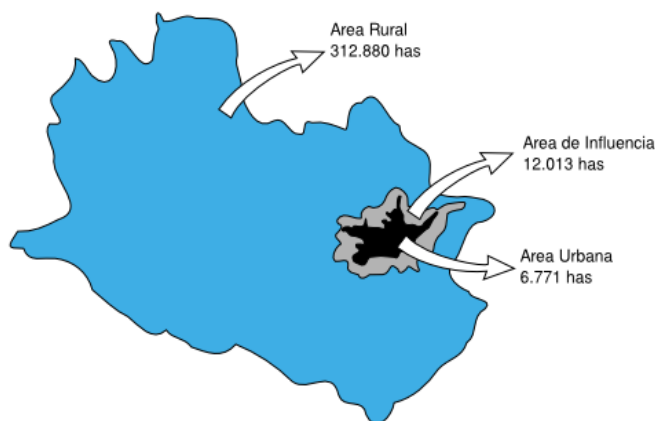
Nota. Elaboración propia.

La ciudad de Santa Ana de los Ríos de Cuenca es la capital del cantón Cuenca en la provincia del Azuay, se ubica dentro de una extensión geográfica al Oeste: 714638,64; al Norte: 9688009,16; al Este: 734424,41 y al Sur: 9675644,86; comprendido en coordenadas proyectadas UTM a la zona 17 Sur por el Datum Internacional WGS84. Según la página oficial de la alcaldía del cantón, Cuenca es la tercera ciudad más poblada del Ecuador comprendida por 15 parroquias urbanas las cuales se visualizan en la Figura 8, comprende una altura promedio de 2 560 metros sobre el nivel del mar y su población es de 417 632 habitantes, los cuales 331 028 se localizan en el área urbana y 86 604 personas viven en sector rural.

El Plan de Ordenamiento Territorial (PDOT) resalta su división de la siguiente manera; un área urbana con una superficie de 6 771 ha; un área de influencia inmediata con una superficie de 12 013 ha y un área rural con una superficie de 312 880 ha. La Figura 9 muestra la descripción de esta división territorial.

Figura 9:

División territorial del cantón Cuenca



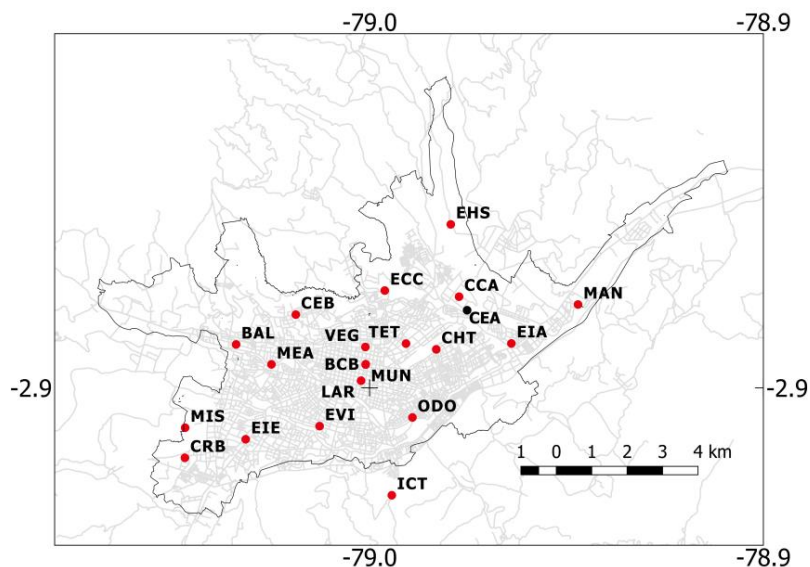
Nota. Adaptado de *Zonas del cantón Cuenca*, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca (https://www.cuenca.gob.ec/page_divisionterritorio)

3.2. Descripción general de la Red de Monitoreo (RM) de la EMOV – EP

La RM de la EMOV - EP es el conjunto de estaciones de monitoreo que cubren la ciudad de Cuenca, estos puntos se muestran en la Figura 10. Con el propósito de dar a conocer la calidad del aire mediante el monitoreo constante, por diferentes metodologías avaladas por la EPA.

Figura 10:

Ubicación de las estaciones de monitoreo de la EMOV - EP



Nota. Tomado del Informe de Calidad del Aire 2021. (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

La Tabla 7 describe la nomenclatura de cada estación, así como su dirección en la ciudad de Cuenca, los contaminantes monitoreados y la escala de monitoreo.

Tabla 7:

Código, dirección, contaminantes monitoreados y escala de monitoreo

Código	Nombre	Ubicación	Contaminantes	Escala
MAN	Machángara	Jardines del Río y Calle Londres	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
EIA	Escuela Ignacio Andrade	Reino de Quito y Avenida González Suárez	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
EHS	Escuela Héctor Sempértegui	Camino a Ochoa León	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
CHT	Colegio Herlinda Toral	Altar Urco y Avenida Paseo de los Cañaris	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
TET	Terminal Terrestre	Avenidas Madrid y España	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
ECC	Escuela Carlos Crespi II	Calle de la Bandolia y Calle del Arpa	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
ODO	Facultad de	Avenida Pasaje		Vecinal

	Odontología – Universidad de Cuenca	de Paraíso y Avenida 10 de Agosto	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	
EVI	Escuela Velasco Ibarra	Avenida Felipe II y Avenida Isabel Católica	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
MEA	Mercado El Arenal	Avenida Remigio Crespo y Avenida de las Américas	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
BAL	Balzay CEA – Universidad de Cuenca.	Avenida Ordóñez Laso y Avenida Cerezos	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
CRB	Colegio Rafael Borja	Vía a Baños	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
VEG	Vega Muñoz	Vega Muñoz y Luís Cordero	NO ₂ , SO ₂ , BTEX	Microescala
CCA	Colegio Carlos Arizaga Vega	Calle J. Lavalle y Calle A. Ricaurte	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, MP ₁₀ , BTEX, MP _{2.5}	Urbana, vecinal
MUN	Municipio	Calle Simón Bolívar y Calle Presidente Borrero	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , CO, MP _{2.5} , MP ₁₀ , PS, BTEX	Urbana, vecinal
EIE	Escuela Ignacio Escandón	Avenida Loja y Calle Ignacio de Rocha	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, MP ₁₀ , BTEX, MP _{2.5}	Urbana, vecinal
BCB	Estación de bomberos	Calle Presidente Córdova y Luís Cordero	NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Microescala
LAR	Calle Larga	Calle Larga y Borrero	NO ₂ , SO ₂ , BTEX	Microescala
ICT	Antenas de Ictocruz	Camino a Ictocruz	O ₃	Regional
CEB	Cebollar	Calle del Cebollar	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal
MIS	Misicata	Calle Carmela Malo	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , PS, BTEX	Vecinal

Nota. Tomado del Informe de Calidad del Aire 2021. (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

La Tabla 8 muestra los métodos empleados para el monitoreo de contaminantes criterio por la RM de la EMOV – EP, en la estación MUN por analizadores automáticos.

Tabla 8:

Método de medición de la estación automática MUN

Contaminante	Método	Marca/modelo
Monóxido de carbono (CO)	Absorción de radiación infrarroja no dispersiva USEPA Método de referencia EQOA-0992-087	Teledyne. T300
Dióxido de azufre (SO ₂)	Fluorescencia por radiación ultravioleta USEPA Método de referencia EQSA-0495-100	Teledyne. T100
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Desplazamiento de fase atenuada de cavidad USEPA Método de referencia EQNA-0514-212	Teledyne. T500U
Material particulado fino (MP _{2.5})	Atenuación de rayos beta USEPA Método equivalente EQPM-0308-170	Met One BAM-1020
Ozono (O ₃)	Absorción de radiación ultravioleta USEPA Método equivalente EQOA-0992-087	Teledyne. T400

Nota. Adaptado de Informe de Calidad del Aire 2021. Fuente: (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

En primera instancia la red tiene una estación automática llamada MUN (centro de la ciudad) que se aprecia en la Figura 11, la misma registra en tiempo real las concentraciones de O₃, CO, SO₂, MP₁₀, MP_{2.5} y NO₂ (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

Figura 11:

Estación MUN (Centro Histórico)



Nota. Tomado del Informe de Calidad del Aire 2021. (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

Dos sensores de material particulado menor a 2.5 micras ($MP_{2.5}$), mismos que se encuentran localizados en la estación CCA y EIE, los cuales miden las concentraciones en la zona norte de la ciudad y sur respectivamente. Los cuales se muestran en las Figuras 12 y 13; estos datos serán utilizados para realizar este estudio (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

Figura 12:

Estación EIE - Sur



Nota. La fotografía fue tomada por el autor el 29 de marzo del 2023.

Figura 13:

Estación CCA - Norte



Nota. La fotografía fue tomada por el autor el 23 de marzo de 2023.

Una subred de pasivos para contaminantes en forma de gas en 19 estaciones, con muestras de 10 a 12 días para concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) y Ozono (O₃) dos veces por mes, y una vez por mes cada 30 días para concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y dióxido de azufre (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

Una subred de depósito de Partículas Sedimentables (PS), con 17 puntos de medición.

Una subred activa de material particulado inferior a 10 micras, conformada por tres equipos semiautomáticos de elevado volumen durante 24 horas consecutivas de exposición (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021).

Una subred de microsensores de bajo costo instalados a finales de noviembre de 2021, que proporcionan información sobre la tendencia de los contaminantes atmosféricos en diferentes puntos dentro del casco urbano (Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021). La descripción de esta subred se presenta a continuación.

3.3. Ubicación microsensores

La Tabla 9 muestra la codificación para la subred de microsensores, resaltando la escala de monitoreo para cada punto en base a los criterios de emplazamiento propuestos por Jerves y Armijos, 2016.

Tabla 9:

Código, nombre, dirección, contaminantes monitoreados y escala de monitoreo

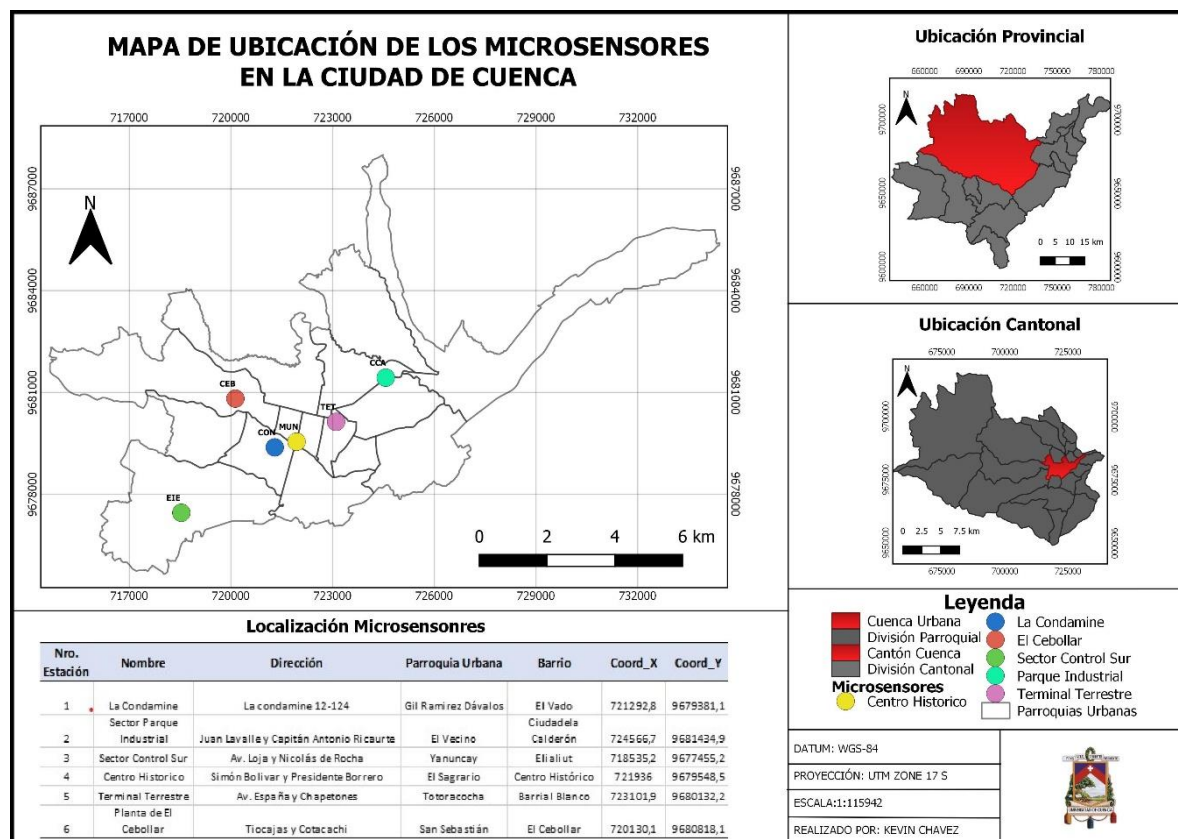
Código	Nombre	Ubicación	Contaminantes	Escala
MUN	Municipio	Calle Simón Bolívar y calle Presidente Borrero		
CCA	Colegio Carlos Arizaga Vega	Calle J. Lavalle y calle A. Ricaurte		
EIE	Escuela Ignacio Escandón	Avenida Loja y Calle Ignacio de Rocha	MP ₁₀ , MP _{2.5} , MP ₁ , CO, O ₃ , NO ₂ , SO ₂ .	Vecinal
TET	Terminal Terrestre	Avenidas Madrid y España		
CEB	Cebollar	Calle del cebollar		
CON	La Condamine	Avenida 3 de Noviembre		

Nota. Elaboración propia.

De igual manera la Figura 14 indica la ubicación espacial de las seis estaciones autónomas de microsensores dentro del área urbana del cantón Cuenca.

Figura 14:

Ubicación geográfica de la subred de microsensores en la ciudad de Cuenca



Nota. Elaboración propia.

3.4. Fuente y validación de los datos

3.4.1. Fuente de datos

Los datos de concentración de contaminantes criterio fueron descargados de la página web de la EMOV – EP. Al igual que, los valores de dirección y velocidad del viento en intervalos horarios, correspondientes a las tres estaciones que cuentan con analizadores automáticos; las seis estaciones de la subred de microsensores y las estaciones meteorológicas, estos archivos fueron descargados en formato “.xls”.

3.4.2. Validación de datos

Los datos horarios de los microsensores corresponden al promedio aritmético de las concentraciones minuto a minuto de la hora correspondiente, para todos los contaminantes

criterio. Los datos horarios de los analizadores corresponden de igual manera al promedio aritmético de las concentraciones minuto a minuto de la hora correspondiente para el caso de los gases. Mientras que, los analizadores de material particulado corresponden a valores de cada hora correspondiente, entregados directamente del equipo.

Al estar estos datos publicados y con el adecuado control de calidad, de acuerdo a lo expuesto por la EMOV – EP en sus informes anuales, no se ha visto la necesidad de aplicar modificaciones. La Tabla 10 indica el porcentaje de datos válidos que tuvo cada metodología para los diferentes contaminantes criterio, durante el año 2022. Considerando el 100 % de cobertura aquellos que se registraron durante todo el año, entregando valores cada hora.

Tabla 10:

Porcentaje de datos válidos durante el 2022 por estación y metodología de monitoreo

Estación	MUN		CCA		EIE		TET	CON	CEB
	I	II	I	II	I	II	I	I	I
Variable									
CO	71*	91	87	---	84	75	93	54*	91
NO ₂	72*	90	87	---	84	---	93	61*	91
O ₃	100	95	100	---	100	---	100	100	100
SO ₂	71*	86	80	---	81	81	93	62*	91
MP _{2.5}	65*	91	80	94	84	47*	90	62*	33*
MP ₁₀	65*	95	80	---	84	---	90	62*	33*
MP ₁	65*	---	80	---	84	---	90	62*	33*

Nota. Elaboración propia. La Tabla 10 representa el porcentaje de datos válidos durante el año 2022 del total de valores registrados (8 760 = 100%), durante ese año en lapsos de tiempo horarios. Siendo (I) para los microsensores y (II) para los analizadores automáticos. Por otra parte, donde no se registra un porcentaje significa que no existe metodología de monitoreo para tal estación. (*) Todos los parámetros que están por debajo del umbral de aceptación igual al 75 % establecido por la EPA.

Tabla 11:

Cantidad de datos válidos por estación y metodología de monitoreo

Estación	MUN		CCA		EIE		TET	CON	CEB
	I	II	I	II	I	II	I	I	I
Variable									
CO	6 243*	7 932	7 617	---	7 367	6 610	8 166	4 733*	7 991
NO ₂	6 317*	7 891	7 628	---	7 390	---	8 158	5 356*	7 995
O ₃	8 760	8 308	8 760	---	8 760	---	8 760	8 760	8 760
SO ₂	6 243*	7 494	8 965	---	7 118	7 124	8 156	5 441*	7 990

MP _{2.5}	5 658*	7 962	7 003	8 272	7 392	4 093*	7 910	5 445*	2 934*
MP ₁₀	5 658*	8 356	7 003	---	7 392	---	7 910	5 445*	2 934*
MP ₁	5 658*	---	7 003	---	7 392	---	7 910	5 445*	2 934*

Nota. Elaboración propia. La Tabla 11 muestra la cantidad de datos por estación y metodología de monitoreo resaltando aquellas (*), que no cubren el criterio mínimo de aceptación del 75 % de datos válidos establecido por la EPA.

3.5. Descripción de la metodología de análisis

El estudio de los datos recopilados se realiza utilizando el software estadístico RStudio (versión 2023.03.1+446), en particular el paquete de análisis "Openair". En tal forma, se considera los criterios de representatividad de la EPA para elegir las estaciones a analizar, aquellas que cubran el umbral mínimo de cobertura no menor al 75 %.

Po otro lado, es importante resaltar que, al analizar una gran cantidad de datos y la generación de varios gráficos, se eligieron aquellos que proporcionen mayor representatividad para este estudio, mientras que el resto de tablas, figuras, fotografías y gráficos se pueden encontrar en el apartado de anexos.

3.6. Análisis preliminar de los datos

La totalidad de los datos por estación y metodología de medición son explorados por herramientas de estadística descriptiva. Las medidas de tendencia central como: la media aritmética y la mediana; su dispersión como: el cuartil 1, el cuartil 3, la desviación estándar; su deformación y apuntamiento como: la asimetría y curtosis. Estas herramientas permiten describir estadísticamente los datos recopilados de concentración de un determinado contaminante, en primera instancia los datos obtenidos por analizadores automáticos (II) y consecuentemente los datos de concentración obtenidos por microsensores (I). Este análisis se realizó mediante gráficos de cajas y tablas que resumen estos cálculos.

No obstante, se expone las fechas de concentración máxima por contaminante y metodología de medición para la estación MUN. La Tabla 13 resume la coincidencia en la medición por ambas metodologías en una fecha y hora determinada. El resumen estadístico se realiza con la función "summary" junto con la función "describe" de la librería "psych", mientras que los gráficos de cajas con la ayuda de la función "Boxplot".

3.7. Análisis geoespacial

El alcance y cobertura de la subred de microsensores y analizadores automáticos de la EMOV – EP, se realiza a través del sistema de información geográfica QGIS (versión 3.1). En donde se calcula el porcentaje de cobertura espacial, que la red de microsensores ha aumentado, mediante el algoritmo de geoproceto llamado Buffer. Esta herramienta procesa un área de influencia para todos los objetos de entrada (estaciones de la RM), usando una distancia fija (escala urbana – vecinal), propuesto por Jerves Cobo & Armijos Arcos, (2016). Con lo cual se determinó el porcentaje de área de cobertura espacial, respecto al área de influencia urbana manifestado en el PDOT de la ciudad, que cubre la Red de Monitoreo para Calidad del Aire a escala urbana.

3.8. Análisis de la calidad del aire con el paquete “Openair”

3.8.1. Requisitos para la entrada de datos

El paquete “Openair” tiene ciertas restricciones antes de usar sus funciones, las cuales es importante corregir antes de empezar el análisis de los mismos. Estas pautas previas al análisis se encuentran en el documento “*A Guide to the Analysis of Air Pollution Data*”, realizado por Carslaw et al., (2023). Los principales requisitos de entrada a RStudio son los siguientes:

- Los datos tienen que estar en un marco de datos o dataframe.
- La columna Fecha/hora debe ser llamada “date”, no se acepta ningún otro nombre.
- La velocidad del viento y la dirección en sus campos deben nombrarse “ws” y “wd” respectivamente.
- Los nombres de las demás variables no deben empezar con un número y haber espacios entre el nombre.
- Los campos de coordenadas deberán estar en grados decimales y serán nombrados como “lat” para latitud y “lon” para longitud.

En primera instancia se resumen los datos a través, de la función “summaryPlot” que da como resultado el comportamiento que tuvo cada parámetro durante el 2022, también muestra los periodos de tiempo donde se perdieron datos, resaltándolos de rojo. Mientras que, en la parte derecha se puede ver la distribución de frecuencias de cada parámetro, también entrega el porcentaje de datos válidos por cada mes, y la cantidad de datos perdidos durante el año. Se puede visualizar estadísticas básicas como el mínimo y máximo valor, al igual que la media, mediana y el percentil 95.

3.9. Análisis direccional

La función “windRose” sirve para trazar las frecuencias de velocidad y dirección del viento, para tres estaciones meteorológicas de la RM de la EMOV – EP. Los cuales se encuentran ubicados en las estaciones MUN, CCA y EIE, representado el centro, norte y sur de la ciudad respectivamente. Los rangos de velocidad de viento se muestran en la base de cada panel, mientras que los círculos grises indican las frecuencias porcentuales.

El ángulo en la cual la dirección del viento proviene, esta dividido por defecto en 30°, las velocidades del viento se presentan en paletas de colores y grosor, mientras que los gráficos representan la proporción de tiempo en que el viento proviene de un cierto ángulo y rango de velocidad. Además, se puede observar los porcentajes de calma cuando estos son iguales a 0 m/s junto con la media en la parte inferior del gráfico.

En el capítulo de resultados se opta por generar un mapa de frecuencias con la rosa de los vientos para cada estación meteorológica de la RM de la EMOV – EP, destacando los prevalentes durante el 2022 de manera espacial y a escala urbana.

3.10. Gráficas polares

Con la función “polarPlot”, se obtuvieron gráficos polares bivariados de concentración de los contaminantes de cada estación acorde al lapso de tiempo establecido, donde muestra la variación de la concentración de contaminantes criterio por velocidad y dirección del viento (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012). El fundamento teórico de estos plots, se explica en el capítulo II “Marco Teórico”, sección 2.10 “Openair un paquete de RStudio”, mientras que la metodología a seguir para la construcción de estos gráficos es propuesta por Carslaw, 2019. En primera instancia, se divide en intervalos iguales los datos de velocidad de viento, dirección del viento y se calcula la concentración media para cada intervalo.

Los componentes del viento u y v se calculan mediante la ecuación 6 y 7, a continuación:

$$u = \bar{u} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\theta}\right) \quad (\text{ecuación 6})$$

$$v = \bar{u} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\theta}\right) \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde \bar{u} es la velocidad media del viento por hora y θ es la dirección media del viento en grados, mientras que C_i es la i -ésima concentración del contaminante, y para su estimación de la superficie de concentración está viene dado por la ecuación 8.

$$\sqrt{C_i} = s(u, v) + e_i \quad (\text{ecuación 8})$$

En este modelo, la concentración transformada por raíz cuadrada es una función suave de los componentes bivariados del viento u y v . Una función suave isotrópica es una función matemática que exhibe suavidad y simetría en todas las direcciones, suavidad se refiere a continuidad, también se considera isotrópica porque u y v están en la misma escala (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012).

3.11. Distribución espacial por gráficos polares

Se realiza una comparación espacial de los gráficos polares bivariados en tres estaciones de la RM. Para ello, se toma en cuenta cuatro contaminantes criterio (MP_{10} , CO , O_3 y NO_2), para los cuales en la estación MUN se considera los analizadores automáticos (II) y las estaciones CCA y EIE los microsensores (I).

La comparación cuantitativa se realiza generando los gráficos polares bivariados sobre cada estación asumido como receptor, con la función “polarMap” y la capa base del paquete “OpenStreetMap”. Junto con las gráficas se añade la escala de colores por concentración, para la diferenciación en las concentraciones y comportamiento de los contaminantes en las tres estaciones.

Cabe resaltar que las estaciones y metodologías de monitoreo seleccionadas para esta comparación, se considera en primera instancia los criterios de cobertura anual y el análisis de regresión y correlación que se verá más adelante. Además, el análisis espacial de los contaminantes representados en estos mapas por gráficos polares son una herramienta muy útil para determinar la dirección de procedencia de los vientos asociados con las más altas concentraciones del contaminante, permitiendo a la vez sugerir posibles fuentes de contaminación (D. Carslaw, 2019).

3.12. Variaciones temporales y tendencias

A partir de la función “timeVariation”, se producen cuatro gráficas respecto a la variación temporal de las concentraciones de contaminantes criterio. El primero hace alusión a la variación del día de la semana, el segundo a la variación media de la hora del día, el tercero un gráfico mensual y finalmente el cuarto una combinación entre la hora del día y el día de la semana. De acuerdo con Hayes y Chatterton, (2009), lo que busca este análisis es encontrar patrones de los datos de contaminación. Por otra parte, esta función permite la visualización de un intervalo de confianza en la media, calculado por defecto mediante remuestreo, dicho intervalo en esta función viene por defecto del 95 % de confianza en la media.

Este análisis se recreó para las estaciones MUN utilizando las concentraciones medidas por analizadores automáticos (II), dado su representatividad a escala urbana. No obstante, para los valores medidos por microsensores (I), se realiza una comparación entre las estaciones CCA, EIE y TET, debido a que son las únicas estaciones que tienen una cobertura de datos superior al 75 %, además de su representatividad a escala vecinal.

Por otro lado, para mostrar las tendencias y verificar patrones en las concentraciones promedio se trabajó con la función “trendLevel”. Con esta función se generaron mapas de calor de tendencias, los cuales en primera instancia permitieron ver la variación en las concentraciones de los contaminantes criterio por mes y hora del día. Con lo cual se pudo determinar cuáles horas por mes se vieron más afectadas por la contaminación durante el 2022 a escala urbana, para ello se utilizó los analizadores automáticos de la estación MUN.

Además de eso, se generaron otras relaciones gracias a la opción de colocar a la dirección del viento como variable categórica en el eje “y”, manteniendo el mes en el eje “x”. Esto ayudo a crear mapas de calor tal como lo propone (D. Carslaw, 2019), los cuales sirvieron para distinguir que direcciones corresponden los valores de concentración media más altos en los diferentes meses del año.

3.13. Análisis de regresión y correlación

La estación MUN de la red de monitoreo de la EMOV – EP, sirve para la validación de datos tanto de los microsensores como de los analizadores automáticos, puesto que el primero tiene un criterio indicativo de contaminación avalado por la European Directive 2008/50/EC (Envea, 2019). Mientras que, el segundo representa una metodología avalada por la EPA (Met One Instruments, 2023; Teledyne API, 2022). La importancia de esta estación radica en poder comparar los datos por ambas metodologías para los contaminantes criterio.

Por tal razón, la metodología a seguir en este punto tiene como enfoque encontrar la relación y concordancia entre ambas metodologías (I) y (II), así como explorar la capacidad de una metodología para predecir los valores de la otra. La metódica a seguir para el objetivo específico de esta tesis es la siguiente:

Importación de datos: Se importa dos archivos en formato “.xlsx” al software RStudio, los cuales contienen la fecha en intervalos de tiempo horarios durante el 2022, y las concentraciones de los seis contaminantes criterio para la estación MUN en cada archivo. Siendo (I) para los microsensores y (II) para los analizadores automáticos. Dentro de este análisis se debe considerar lo siguiente:

- Tomar en cuenta los valores de concentración de los contaminantes criterio, para aquellas fechas en las que ambas metodologías reportaron estos valores en simultáneo.

Análisis exploratorio de datos: Se genera gráficos de dispersión para todos los contaminantes criterio, donde visualmente se verifica la relación lineal entre ambas metodologías para dichos contaminantes.

Pruebas de normalidad: Para los datos ambientales por ambas metodologías, se aplica pruebas de normalidad, donde se rechaza o no la normalidad de los mismos. Es importante destacar que, a pesar de haber realizado pruebas estadísticas, se tuvo en cuenta el teorema del límite central.

Para verificar esta hipótesis, se lleva a cabo un análisis de la normalidad de los datos, mediante la prueba “Lilliefors”, con la función “lillie.test” del paquete “nortest”, que asume la media y varianza poblacional como desconocidos. Lo que se pretende al realizar esta prueba es no rechazar la hipótesis nula (datos siguen una distribución normal), si el p_value es mayor a 0,05.

Correlación de Spearman: Por medio de la función “corrplot” se genera una matriz de correlación por el método de “Spearman” para datos no normales. Identificando la relación que determine la fuerza y dirección entre ambas metodologías para diferentes contaminantes. La matriz representa el coeficiente de correlación de “Spearman” el cual varía en un rango de -1 a 1, donde -1 indica una relación negativa perfecta, 1 indica una relación positiva perfecta y 0 indica una ausencia de relación lineal (Kottegoda et al., 2008).

Además, los coeficientes de correlación de “Spearman” no son sensibles a los valores atípicos, lo que le sugiere ser una herramienta robusta para analizar datos en presencia de valores extremos (Reimann et al., 2008), por ende es aplicable a nuestras series de datos.

Transformación de datos: Se aplica la transformación Box – Cox, a los datos de MP_{2.5} para ambas metodologías, con la intención de mejorar la linealidad y normalizar los mismos. Esta transformación está pensada para valores estrictamente positivos y se eligió la transformación de ambas variables tanto la predictora como respuesta, con la intención de evaluar su correlación y probar su normalidad (Kottegoda et al., 2008). Por medio, de la importación del paquete “MASS” a RStudio, y la función “boxcox” en donde se evalúa esta transformación con los valores de lambda encontrados.

Finalmente, se aplica la ecuación 3 para transformar los datos, y se valora la correlación y normalidad de los mismos, además se presentan gráficos de histogramas y Q - Q para los datos antes y después de la transformación.

Análisis de regresión: Con los datos transformados se aplica pruebas de hipótesis de normalidad y se calcula el coeficiente de correlación de “Spearman”, para determinar la viabilidad de generar un modelo de regresión lineal para este parámetro.

No obstante, con la finalidad de otorgar relevancia a la utilidad de la subred de microsensors como indicadores de contaminación y que sirvan de soporte para la estación automática, se emplea un modelo de regresión lineal simple con la función “lm”. Esto se aplica aquellos contaminantes que demuestren una buena correlación según el coeficiente de “Spearman”, en relación con sus respectivas metodologías de monitoreo ambiental.

De esta forma, se calcula los coeficientes de regresión, los valores p, el error residual estándar, el coeficiente de determinación R^2 . Además, se toma en consideración el siguiente criterio:

- Eliminar las filas que contengan ceros de ambas metodologías, excepto aquellos pares de datos en que ambas metodologías tengan concentración cero en una misma fecha.

Validación cruzada triple (*Three-fold cross validation*): La calidad de predicción del modelo, es evaluada por medio de una validación cruzada triple para los datos de entrada. La validación cruzada es un método de “resampling” muy útil para evaluar la capacidad de un modelo para predecir la variable respuesta. Además, puede servir para seleccionar el nivel de flexibilidad adecuado o grado del polinomio (Sohil et al., 2022). Se consideran algunas definiciones en cuanto a validar un modelo de regresión, expuestas por Sohil et al., (2022):

Datos de entrenamiento: Son aquellas observaciones con las que se utiliza para generar el modelo (Sohil et al., 2022).

Datos de validación: Son aquellas observaciones pertenecientes al mismo conjunto de datos que conforman los datos de entrenamiento, pero no se emplean para generar el modelo (Sohil et al., 2022).

Error de entrenamiento: Error que comete el modelo al predecir observaciones que pertenecen a los datos de entrenamiento (Sohil et al., 2022).

Error de prueba: Error que comete el modelo al predecir observaciones de los datos de validación, y que por lo tanto el modelo no ha visto (Sohil et al., 2022).

Para datos cuantitativos, el error se mide mediante el error medio cuadrático (MSE), de esta forma el error de prueba es mucho más informativo, debido a que refleja el error que tiene el modelo al predecir nuevas observaciones para las que se conocen los predictores pero no la variable respuesta (Sohil et al., 2022).

Básicamente, la validación cruzada triple pertenece al método “K-Fold Cross-Validation” el cual es un proceso iterativo, que divide aleatoriamente la muestra en k grupos del mismo tamaño. Por ende, uno de los grupos se emplea como datos de validación y k-1 grupos sirven como datos de entrenamiento, este proceso se repite k veces, usando un grupo distinto de datos de validación en cada iteración (Sohil et al., 2022).

Finalmente, la métrica estadística utilizada corresponde al promedio del error de prueba de k estimaciones $CV_{(k)}$, como estimación final, el cual se calcula a través de la ecuación 9 expuesta por Sohil et al., (2022):

$$CV_{(k)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (MSE_i) \quad (\text{ecuación 9})$$

De esta manera, la metodología para validar el modelo creado consiste en dividir el conjunto de datos en tres partes iguales aleatoriamente y cada una se usa para la validación, mientras que el resto se usa para el entrenamiento, habiendo en total tres iteraciones, que finalmente calcula el $CV_{(k)}$ generado con k=3. La estimación del error de prueba se realiza gracias a la función “cv.glm” del paquete “boot” (Sohil et al., 2022)

3.14. Análisis de los datos sobre la base de excedencias

Para este análisis se considera la estación automática MUN y la subred de microsensors, para evaluar los límites permisibles de los diferentes contaminantes criterio. Mediante la creación de tablas donde se compara las excedencias de concentración tanto para la normativa nacional NECA como para las recomendaciones de la OMS (2005) y (2021). Utilizando aquellos contaminantes que cumplen los criterios de representatividad de la EPA.

Por un lado, mediante tablas se compara los promedios anuales de $MP_{2.5}$, MP_{10} , SO_2 y NO_2 , representando la exposición a largo plazo. Mientras que, para el corto plazo (promedios en 24 horas), se realiza el análisis por diagramas calendario que se explican a continuación:

3.14.1. Diagramas de calendario

Los calendarios de concentraciones de contaminantes criterio son desarrollados con la función “calendarPlot”, y sirven para determinar de forma visual, los días en donde los contaminantes criterio superaron la norma en 24 horas. Para el desarrollo de estos gráficos se utilizaron los datos de la estación automática MUN debido su criterio de aceptación por la EPA (Met One Instruments, 2023; Teledyne API, 2022). Se tienen las siguientes consideraciones para la generación de dichos gráficos:

- Los valores límite para el rango de categorizado en la leyenda, comprende los estipulados en la NECA para 24 horas. A excepción, del NO₂ el cual se asume el valor guía de la OMS 2021 para NO₂ en 24 horas (25 µg/m³), ya que no existe valor en la NECA. Al igual que, para el CO en 24 horas (4 mg/m³). Por otra parte, no se genera un calendario de O₃ dado que no existe normativa en 24 horas.
- Los calendarios consideran el umbral de cobertura estipulado por la EPA, para que muestren los días que tuvieron el criterio de tener por lo menos el 75 % de valores en un lapso de tiempo diario y no se muestren los días que no cumplieron este criterio de representatividad de los datos. El categorizado de la función comprende la media de los valores diarios.

3.15. Comparación de la NECA y OMS por series temporales

El análisis temporal del año 2022 de los contaminantes criterio está definido por la librería “ggplot”. Por la cual se muestra de forma compacta en diferentes paneles y a diferente escala, la serie temporal de cada una de ellos. Este análisis consideró en primera instancia a la estación MUN y las concentraciones promedio diarias monitoreadas por (II), consecuentemente a todas las concentraciones promedio diarias monitoreadas por (I) de la estación CCA, EIE y TET.

Añadido al gráfico temporal se colocó una línea de referencia para el valor límite promedio correspondiente a los niveles máximos permisibles en 24 horas propuesto por la NECA y las recomendaciones de la OMS tanto del 2005 como la actualización del 2021.

Capítulo 4

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos planteados en el presente trabajo de titulación con su respectivo análisis.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis descriptivo de los datos

En esta sección se realiza una evaluación descriptiva de las concentraciones de contaminantes criterio por estación y metodología. Consecuente a esto, se presentan las fechas en las que se registraron los niveles máximos de concentración para cada contaminante para la estación MUN, clasificados por estación y metodología de monitoreo. La Tabla 12 resume estadísticamente los datos recopilados por las estaciones que cuentan con analizadores automáticos en la ciudad y tienen una representatividad a escala urbana.

Tabla 12:

Resumen estadístico de las estaciones que cuentan con analizadores automáticos (II)

Escala Urbana										
Estación	Criterio	\bar{x}	Med	S	Max	Q1	Q3	g1	g2	Na´s
MUN	CO	0,27	0,16	0,32	2,11	0,01	0,43	1,64	2,97	828
	O ₃	25,66	21,55	20,97	116,80	7,45	38,28	0,90	0,34	452
	NO ₂	20,54	18,89	10,86	93,70	13,10	26,23	0,98	2,16	869
	SO ₂	5,15	2,63	7,29	58,52	0,20	7,10	2,63	9,30	1266
	MP ₁₀	19,93	17,00	13,70	190,00	11,00	25,00	2,41	11,84	404
	MP _{2.5}	14,57	12,29	9,57	155,22	8,47	18,44	2,40	14,81	798
CCA	MP _{2.5}	11,87	10,00	9,07	205,00	6,00	15,00	4,46	56,22	488
EIE	CO	0,43	0,32	0,52	6,66	0,00	0,67	3,11	22,40	2150
	SO ₂	3,39	2,35	3,78	48,30	1,14	4,27	2,83	14,22	1636
	MP _{2.5}	3,43	2,30	5,49	227,78	1,40	3,70	19,59	704.97	4667

Nota. Elaboración propia. Las medidas de tendencia central expuestas en la tabla 11 son la media (\bar{x}), mediana (Med), el cuartil 1 (Q1) y 3 (Q3), mientras que la medida de dispersión calculada fue la desviación estándar (S). Las medidas de apuntamiento y deformación como el coeficiente de asimetría de Fisher (g1) y el coeficiente de curtosis (g2). Además, de los datos faltantes por estación y contaminante para cada set de datos (Na´s).

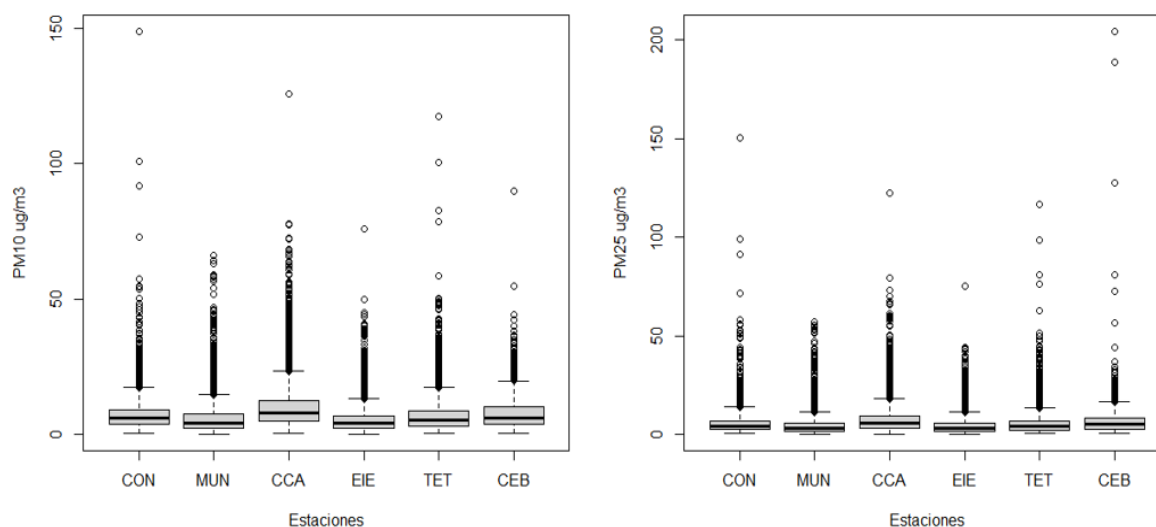
Las métricas estadísticas de centralización, dispersión y deformación de los datos de concentración de contaminantes criterio, permiten describir lo siguiente:

- Respecto a la media de concentración para el $MP_{2.5}$ la estación MUN es mayor que la estación CCA y EIE, sin embargo, la estación EIE presentó el valor máximo respecto a las otras dos estaciones.
- Las concentraciones de CO son mayores respecto a la media en la estación CO que la estación MUN, mientras que para SO_2 la estación MUN presentó los valores mayores respecto a la media.
- La dispersión de las concentraciones de los diferentes contaminantes se considera moderadamente disperso respecto a su media, en todas las estaciones.
- La distribución de los datos de concentración de contaminantes criterio presentan asimetría positiva y curva leptocúrtica a excepción del CO, O_3 y NO_2 de la estación MUN que tienen una distribución más aplanada.

El resumen de los datos también indica que, durante el año 2022, hubo mayor cantidad de datos faltantes de forma horaria para la estación EIE respecto al parámetro $MP_{2.5}$.

Figura 15:

Diagramas de caja para MP_{10} y $MP_{2.5}$ subred de microsensores (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia. A la izquierda se aprecia los gráficos de caja para MP_{10} , mientras que a la derecha para $MP_{2.5}$ en todas las estaciones de la subred de microsensores.

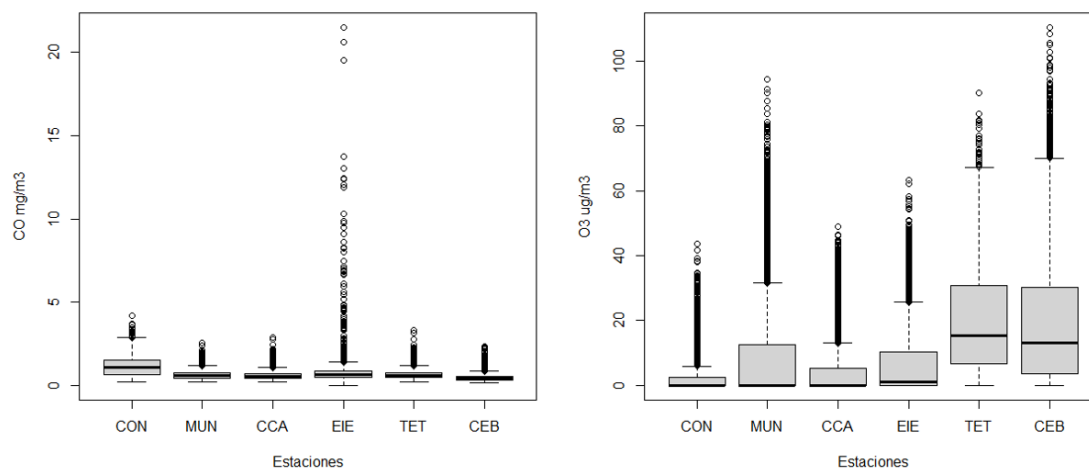
Los datos recopilados por las diferentes estaciones para MP_{10} y $MP_{2.5}$ durante el 2022, presentan una asimetría positiva (cola larga a lado derecho), en ambos casos se tiene gran cantidad de valores extremos que no pueden ser explicados por la distribución.

Además de presentar una distribución con pico pronunciado o leptocúrtica, existe un valor en la mediana mayor en la estación CCA respecto a las otras. Respecto al valor máximo las

estaciones CON y CEB presentaron concentraciones superiores a comparación con las otras estaciones y sus valores máximos. Finalmente, resumiendo las diferentes series de datos el Anexo 1 indica que la estación CEB tuvo mayor ausencia de datos para ambos contaminantes respecto a las demás estaciones.

Figura 16:

Diagramas de caja para CO y O₃ subred de microsensors (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia. A la izquierda se aprecia los gráficos de caja para CO, mientras que a la derecha para O₃ en todas las estaciones de la subred de microsensors.

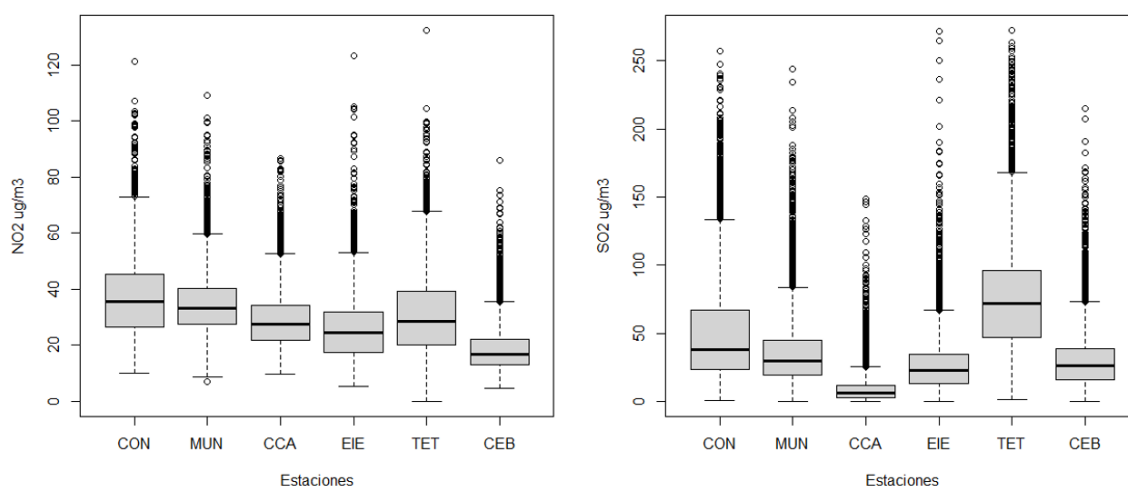
Los valores de las concentraciones tanto de CO como de O₃ presentan una distribución asimétrica positiva, con pico pronunciado o leptocúrtica en su deformación. Sin embargo, las estaciones TET y CEB tienen distribuciones más aplanadas.

Respecto a la mediana las concentraciones de la estación CON superan las demás, mientras que mayor cantidad de valores extremos tiene la estación EIE. En todas las estaciones para ambos contaminantes se presentan valores extremos hacia arriba que no pueden ser explicados por su distribución.

Por otra parte, las concentraciones de O₃ tanto en las estaciones CON, MUN, CCA y EIE presentan una mediana igual o cercana a 0 como punto medio de sus distribuciones, mientras que existe mayor variabilidad o dispersión en las estaciones TET y CEB. Finalmente, respecto a la ausencia de datos los microsensors de O₃ fueron los que menor ausencia de datos tuvieron en todas sus estaciones respecto a los demás microsensors.

Figura 17:

Diagramas de caja para NO₂ y SO₂ subred de microsensores (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia. A la izquierda se aprecia los gráficos de caja para NO₂, mientras que a la derecha para SO₂ en todas las estaciones de la subred de microsensores.

Para los contaminantes criterio NO₂ y SO₂ en todas sus estaciones de monitoreo estas presentan distribuciones asimétricas positivas. Sin embargo, respecto a su deformación estas distribuciones son más aplanadas respecto a los valores de NO₂. Todas las estaciones presentan valores extremos hacia arriba que no pueden ser explicados por su distribución, a excepción de la estación MUN que tiene un valor fuera de ámbito por debajo del extremo inferior.

Por otra parte, respecto a la centralización de sus distribuciones esta nos indica que para los valores de NO₂ la estación CON presentan una mediana mayor que el resto de estaciones. Mientras que, la estación TET para los valores de SO₂ presenta una mediana significativamente mayor que el resto de estaciones. Finalmente, se expone la Tabla 13 para relacionar la concentración máxima de los contaminantes criterio por metodología de medición para la estación MUN, durante el 2022 en la ciudad de Cuenca.

Tabla 13:

Fechas de valores máximos de concentración durante el 2022 monitoreados por (I) y (II)

Estación	Criterio	(II)		(I)	
		Máximo	Fecha	Máximo	Fecha
MUN	CO	2,11	2022-06-06 18:00:00	2,59	2022-06-06 18:00:00
	O ₃	117,00	2022-09-06 10:00:00	94,30	2022-09-06 10:00:00

NO ₂	93,70	2022-09-05 20:00:00	109,00	2022-09-05 20:00:00
SO ₂	58,50	2022-12-27 07:00:00	244,00	2022-05-06 23:00:00
MP ₁₀	190,00	2022-01-01 00:00:00	66,20	2022-02-03 07:00:00
MP _{2.5}	155,00	2022-01-01 01:00:00	57,00	2022-02-03 07:00:00

Nota. Elaboración propia.

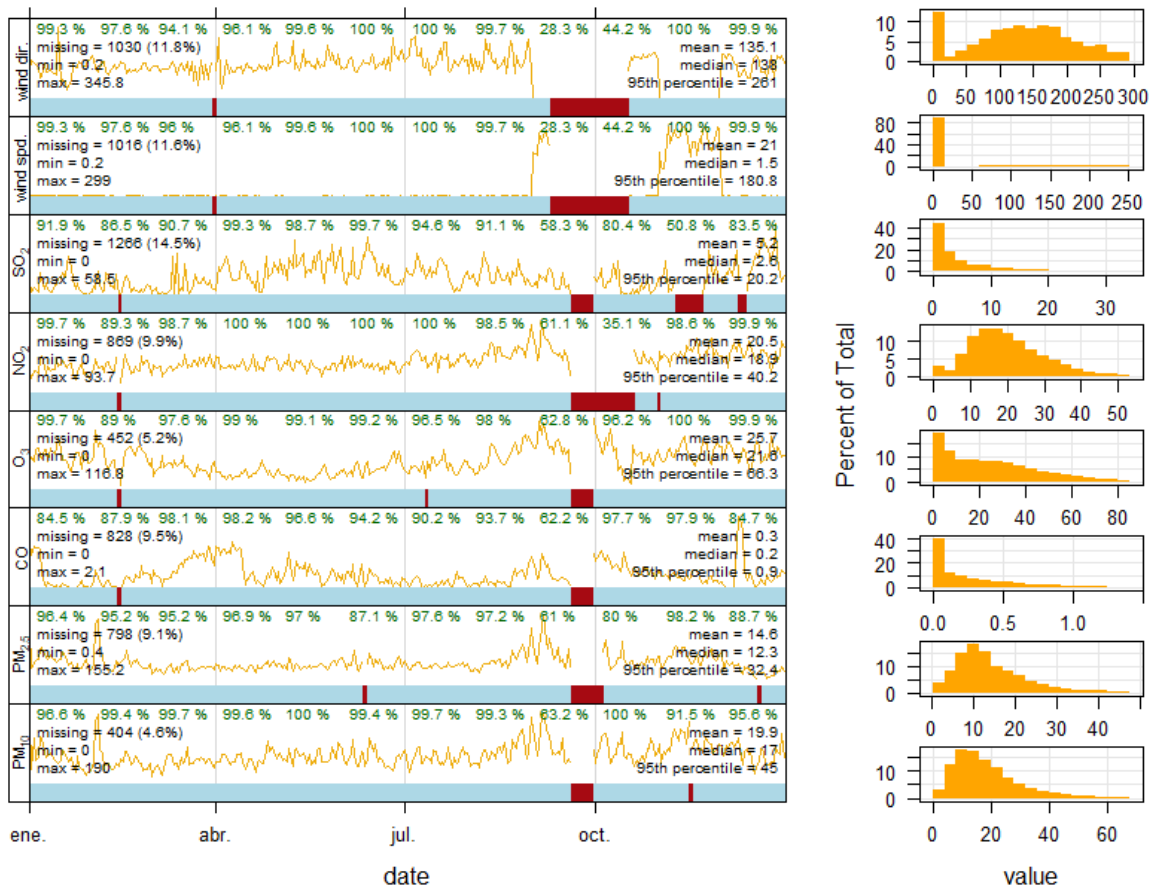
Los valores de concentración máxima de los microsensores coinciden en la fecha y hora exacta con los valores de los analizadores automáticos, para el CO, O₃ y NO₂. Sin embargo, las concentraciones máximas de los contaminantes SO₂, MP₁₀ y MP_{2.5} no coincidieron en sus fechas. De esta manera, se resalta la utilidad que tienen los microsensores para identificar concentraciones máximas en el aire ambiente, mediante los microsensores antes mencionados para la estación MUN. Las unidades para los contaminantes son (µg/m³) a excepción del CO (mg/m³).

4.2. Resumen gráfico

En la Figura 15, se resumen gráficamente los valores de los contaminantes criterio de la estación MUN, para analizadores automáticos (II).

Figura 18:

Resumen gráfico de la estación MUN monitoreados por (II) durante el 2022



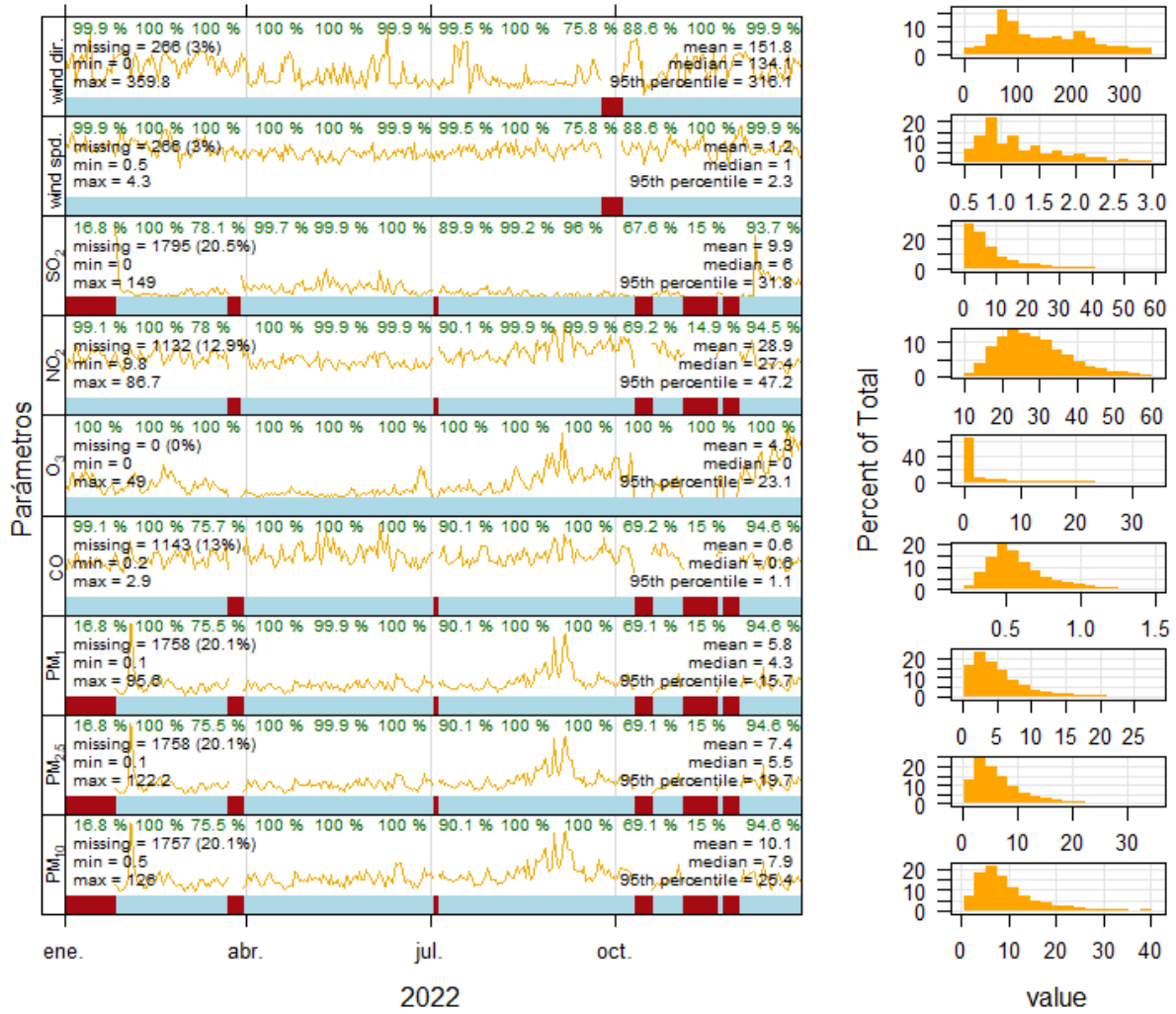
Nota. Elaboración propia.

Sobre esta figura se resalta la última semana del mes de septiembre y primera semana del mes de octubre donde hubo ausencia total de datos, para todos los parámetros incluido las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento. Sin embargo, para este análisis cumplen con los criterios de representatividad resumidos en las Tablas 10 y 11.

En el caso de la subred de microsensores, el resumen gráfico de los datos disponibles se encuentra en el Anexo 2. No obstante, para las estaciones CCA y EIE se analizan sus resultados en este capítulo, debido a que cumple el criterio de representatividad y cuentan con una estación meteorológica en el lugar.

Figura 19:

Resumen gráfico de la estación CCA monitoreados por (I) durante el 2022



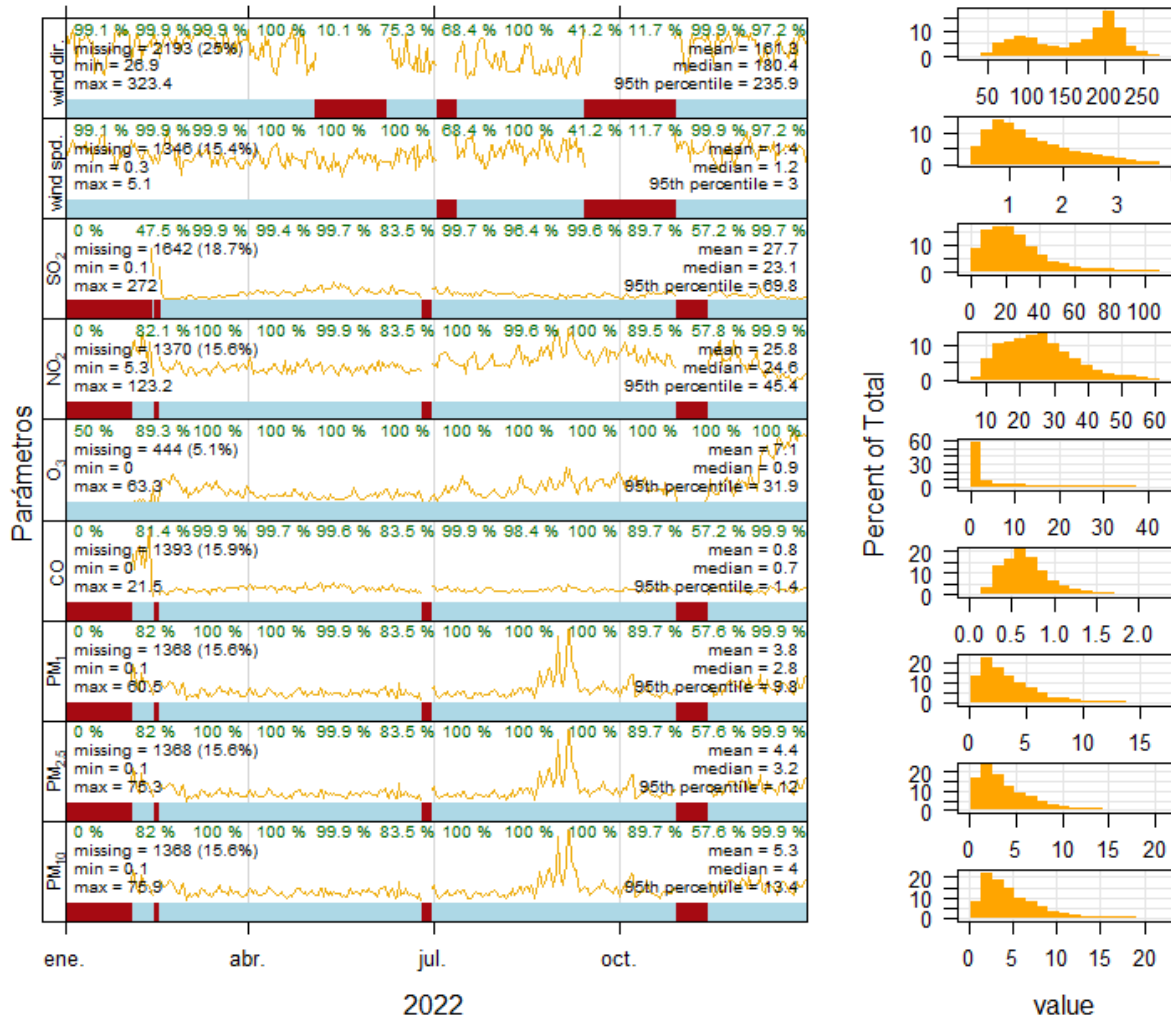
Nota. Elaboración propia.

El mes de octubre presentan mayor ausencia de datos y a nivel mensual los porcentajes de cobertura para ese mes son menores al de representatividad a excepción del O₃ y las variables meteorológicas de velocidad y dirección del viento.

También es notorio que durante el mes de enero el sensor simultáneo de material particulado MP₁₀, MP_{2.5} y MP₁ no cubren el porcentaje de representatividad.

Figura 20:

Resumen gráfico de la estación EIE monitoreados por (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia.

El resumen gráfico de los contaminantes criterio muestra una ausencia total de cobertura para el mes enero del año 2022, a excepción del sensor de O₃ y las variables de dirección y velocidad del viento. Mientras que, en los meses de septiembre y octubre existen baja representatividad de cobertura para las variables de velocidad y dirección del viento, que son de interés para el análisis posterior.

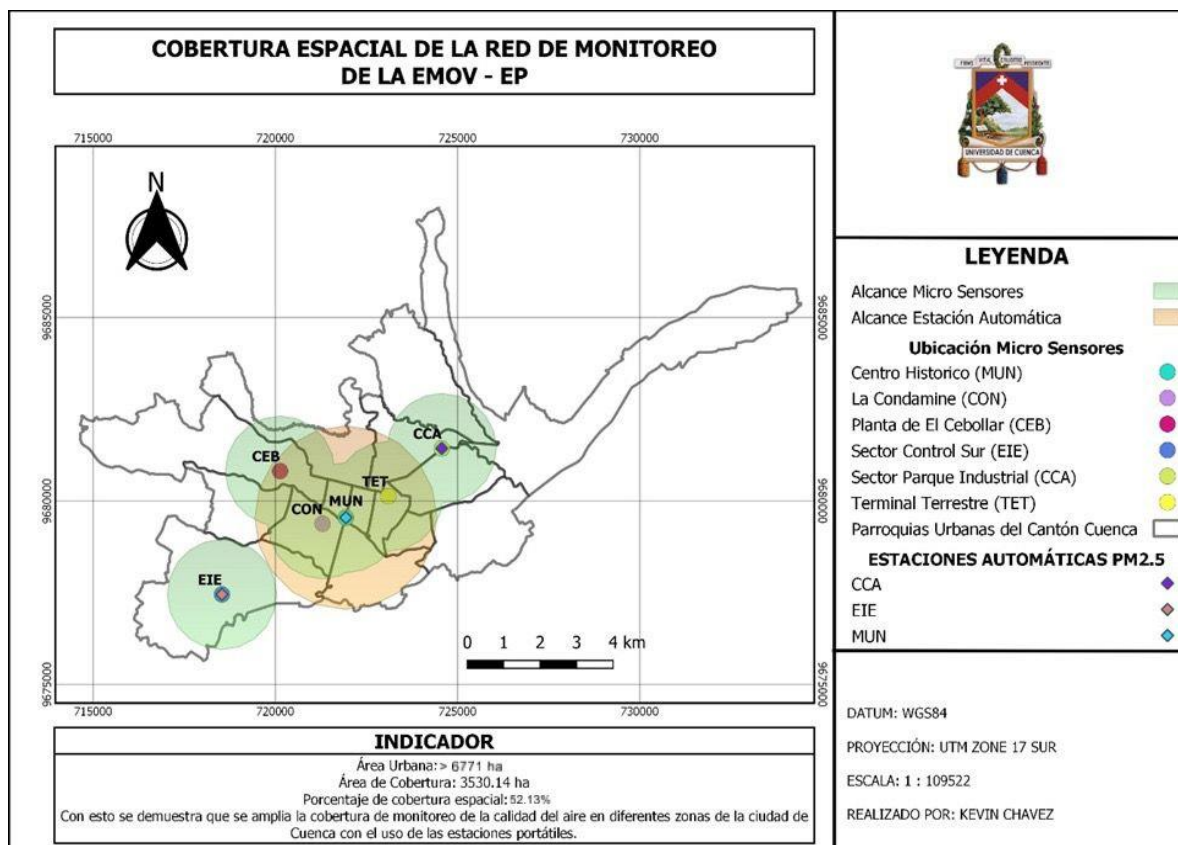
4.3. Cobertura espacial

En la Figura 21 se puede observar un buffer de representatividad espacial para dos metodologías de medición. Lo que está en color verde claro representa la escala vecinal de los microsensors (I), que, junto con la estación automática (II) en color rosa y escala urbana, abarcan una cobertura espacial de 3 530,14 hectáreas, del total de área urbana de Cuenca

(6 771 ha) estipulado por el PDOT municipal. Lo que significa un porcentaje de cobertura espacial del 52,13 %, basados en la escala de representatividad de la estación automática MUN y la subred de microsensores.

Figura 21:

Cobertura espacial de la RM de la EMOV - EP



Nota. Elaboración propia. De esta manera, se demuestra que la EMOV - EP ha aumentado la cobertura espacial en la zona urbana de la ciudad, considerando la implementación de la subred de microsensores a escala vecinal.

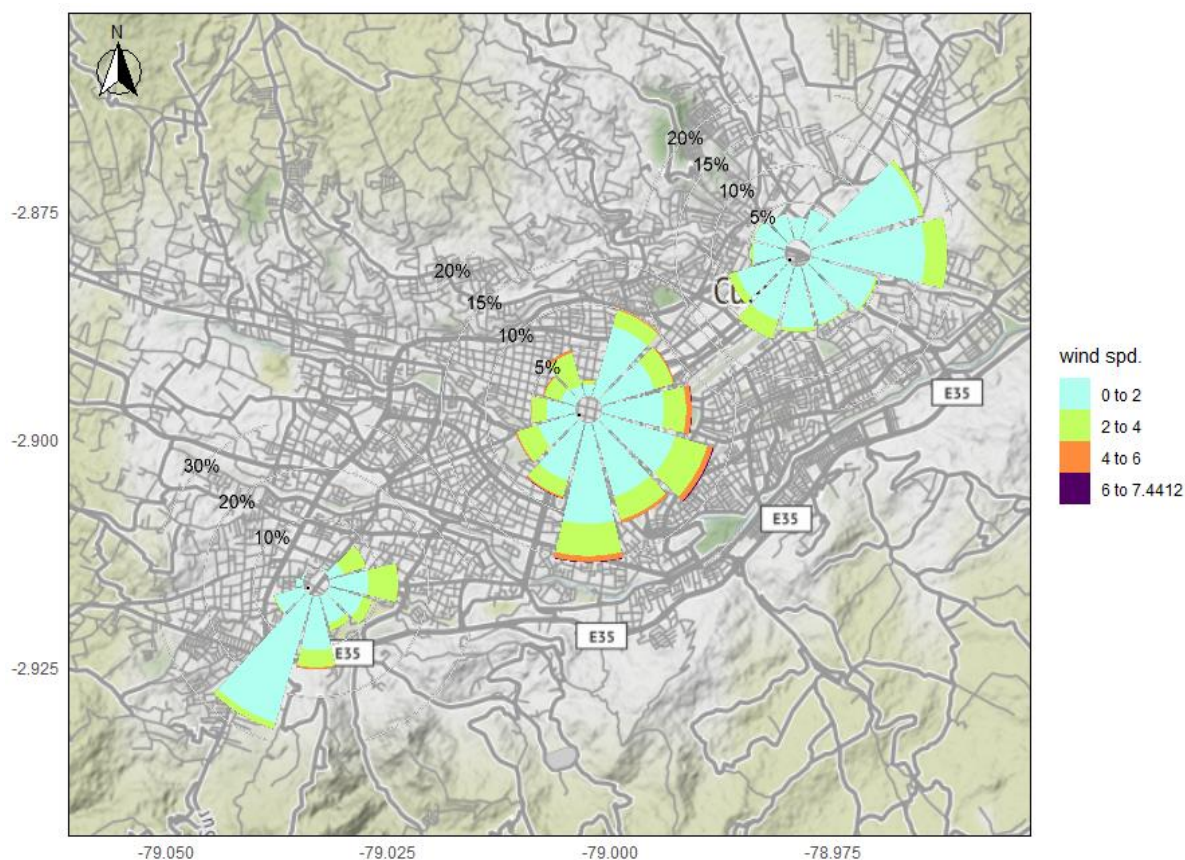
4.4. Análisis direccional

4.4.1. Mapa de frecuencias de la dirección y velocidad del viento

La Figura 22 muestra el resultado de las frecuencias meteorológicas respecto a la velocidad y dirección del viento durante el 2022, generado con la función “windroseMapStatic”, para las tres estaciones meteorológicas de la EMOV – EP centro, norte y sur de la ciudad.

Figura 22:

Mapa de frecuencias de vientos para las estaciones meteorológicas de la EMOV - EP



Nota. Elaboración propia. El mapa representa la frecuencia de la dirección proveniente del viento, según la rosa de los vientos.

Durante el 2022 la velocidad del viento fue más frecuente en rangos de velocidad entre 0 y 2 m/s; mostrando un porcentaje de calma de 0,1 %, 0 % y 11,4 % para el centro, norte y sur respectivamente. Cabe resaltar que los vientos prevalentes fueron del Este, Sur y Suroeste, en otras palabras, que los vientos provienen de esas direcciones.

La Tabla 14 resume los valores de los parámetros dirección (wd) en grados y velocidad (ws) en m/s, por estación de la red meteorológica.

Tabla 14:

Resumen estadístico por estación

Estación	s (ws)	\bar{x} (ws)	Max (ws)	s (wd)	\bar{x} (wd)
MUN	1	1,83	7,44	85,5	156
CCA	0,56	1,22	4,3	86,8	152
EIE	0,81	1,46	5,13	58,4	161

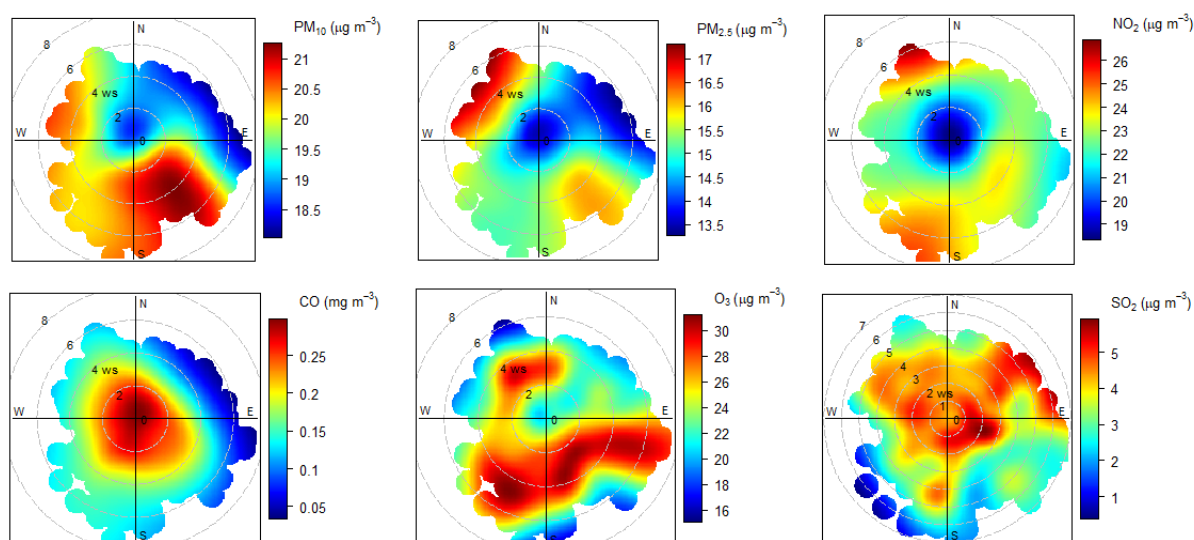
Nota. Elaboración propia.

4.4.2. Gráficos polares estación MUN, EIE y CCA

La Figura 23 muestra los gráficos polares bivariados para las concentraciones de seis contaminantes criterio, monitoreados en la estación MUN por analizadores automáticos (II) durante el 2022.

Figura 23:

Gráficos polares de la estación MUN monitoreados por (II) durante el 2022



Nota. Elaboración propia. Las gráficas polares analizan el comportamiento de las concentraciones, en base a sus medias, considerando la velocidad y dirección del viento proveniente en un receptor (estación). El centro del gráfico representa el origen (estación), mientras que, la velocidad del viento se incrementa a medida que se aleja del origen.

Los gráficos generados para la estación MUN considera una escala de representatividad urbana, como lo indica la Tabla 2. De esta manera, en la estación MUN el material particulado presenta diferencias en su comportamiento. Para el caso del MP₁₀ se aprecia concentraciones altas cuando los vientos están a velocidades entre 3 a 6 m/s en la dirección proveniente del cuadrante sureste. Por el contrario, las concentraciones de MP_{2.5} son elevadas cuando los vientos son provenientes del noreste a velocidades altas entre los 5 y 6 m/s, indicando una fuente lejana de contaminación.

Caso similar es el comportamiento del NO₂, el cual indica tener una contribución alta en sus concentraciones producto de una influencia de fuentes regionales. Dado que, sus elevados

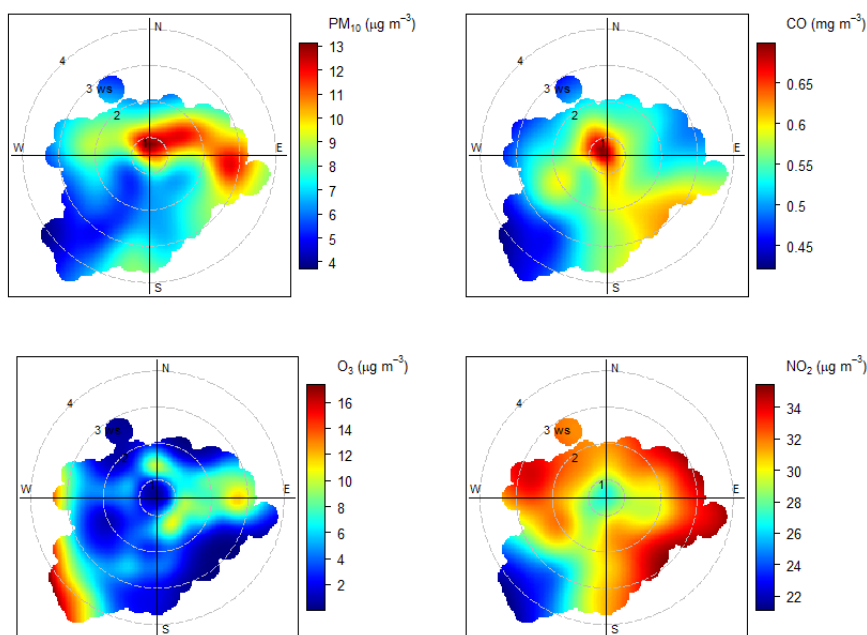
niveles de contaminación se producen con velocidades altas superiores a 6 m/s, provenientes del noreste.

Las mayores concentraciones de CO se presentan cuando los vientos están en calma, determinando la influencia puntual de contaminación, lo que podría ser ocasionado por el tráfico vehicular, en todas las direcciones del viento. De igual manera, el comportamiento del SO₂ presenta concentraciones mayores cercanas al origen del gráfico, aunque una ligera variabilidad cuando los vientos tienen velocidades altas resaltando los cuadrantes noreste y sureste.

El gráfico polar de O₃, revela una relación inversa con el comportamiento del NO₂, CO ya que procede de múltiples direcciones y a diferentes velocidades. Al ser un contaminante secundario, formado por reacciones fotoquímicas en la atmósfera, también se destruye a través de reacciones químicas con los óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, se espera menores valores de concentración de ozono en estaciones ubicadas en sectores con altas concentraciones de óxidos de nitrógeno.

Figura 24:

Gráficos polares de la estación CCA monitoreados por (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia.

De igual manera, se generan los diagramas polares bivariados para la estación CCA con los datos entregados por los microsensores (I). Este análisis considera únicamente aquellos

microsensores que presentaron una correlación de “Spearman” positiva y fuerte frente a los analizadores, estos son el caso del MP_{10} , CO , O_3 , y NO_2 .

Para el caso del material particulado inferior a 10 micras el comportamiento del mismo tiene una influencia directa del viento proveniente del este, resaltando concentraciones altas respecto a su media en un rango de velocidad tanto en calma como en velocidades de viento de hasta 3 m/s.

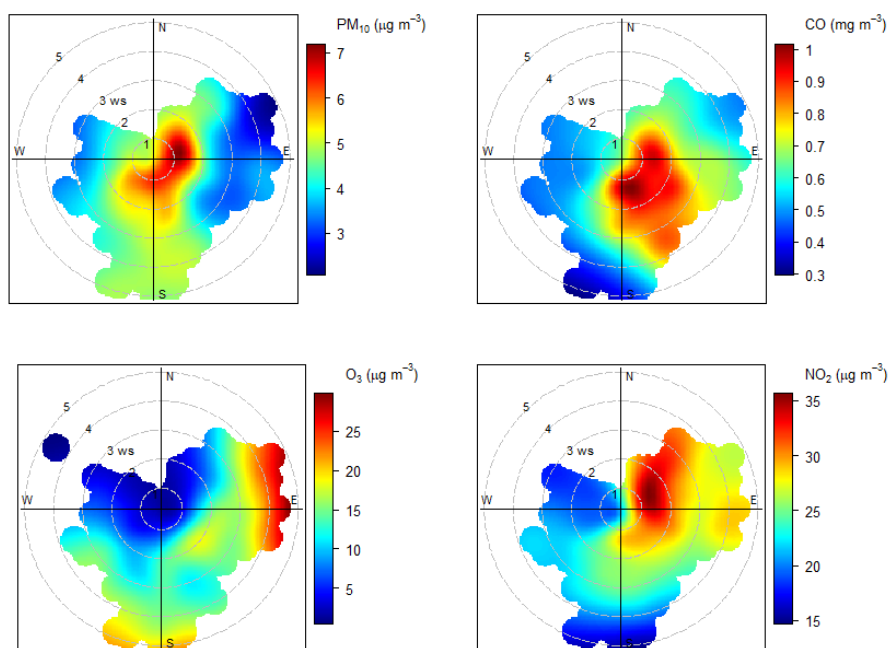
El CO , tiene un comportamiento muy localizado en sus concentraciones altas, siendo estas cuando el viento se encuentra en calma.

Respecto al NO_2 , este tiene una gran variabilidad en las concentraciones altas provenientes de varias direcciones. Sin embargo, la rosa de los vientos en esta estación indica una prevalencia de los vientos del este y noreste, lo cual coincide con las concentraciones altas de este contaminante en un rango de velocidad de 2 a 4 m/s, lo que indicaría que la fuente originaria se encuentra en una escala vecinal y en esa dirección.

El comportamiento del O_3 a escala vecinal, indica que sus concentraciones altas no se ven influenciadas por una fuente puntual o localizada a la estación de monitoreo, puesto que debido a su formación química este se destruye con la presencia de óxidos de nitrógeno, lo cual está muy marcado en esta estación tal como lo muestra el gráfico polar de NO_2 . Mas bien, las concentraciones altas de este contaminante se registran cuando los vientos provienen del suroeste a velocidades altas.

Figura 25:

Gráficos polares de la estación EIE monitoreados por (I) durante el 2022



Nota. Elaboración propia.

Para la generación de los diagramas polares en la estación EIE, se tiene en cuenta el mismo criterio de elección que para la estación CCA. Además, que esta estación tiene una escala de representatividad vecinal.

Las concentraciones de MP₁₀ durante el 2022 en la estación EIE, considera una ligera variabilidad en sus concentraciones altas cuando estos provienen de direcciones de los cuadrantes NE y SE. Además, se considera que la fuente de influencia es local, puesto que las velocidades de viento influyente fueron entre 1 a 2 m/s.

Las concentraciones de CO al contrario de las estaciones MUN y CCA, la estación EIE tiene concentraciones altas no tan localizadas al receptor. Puesto que las concentraciones altas tienden a provenir del sureste determinando una fuente de contaminación directa en esa dirección, en rangos de velocidad de 1 a 3 m/s.

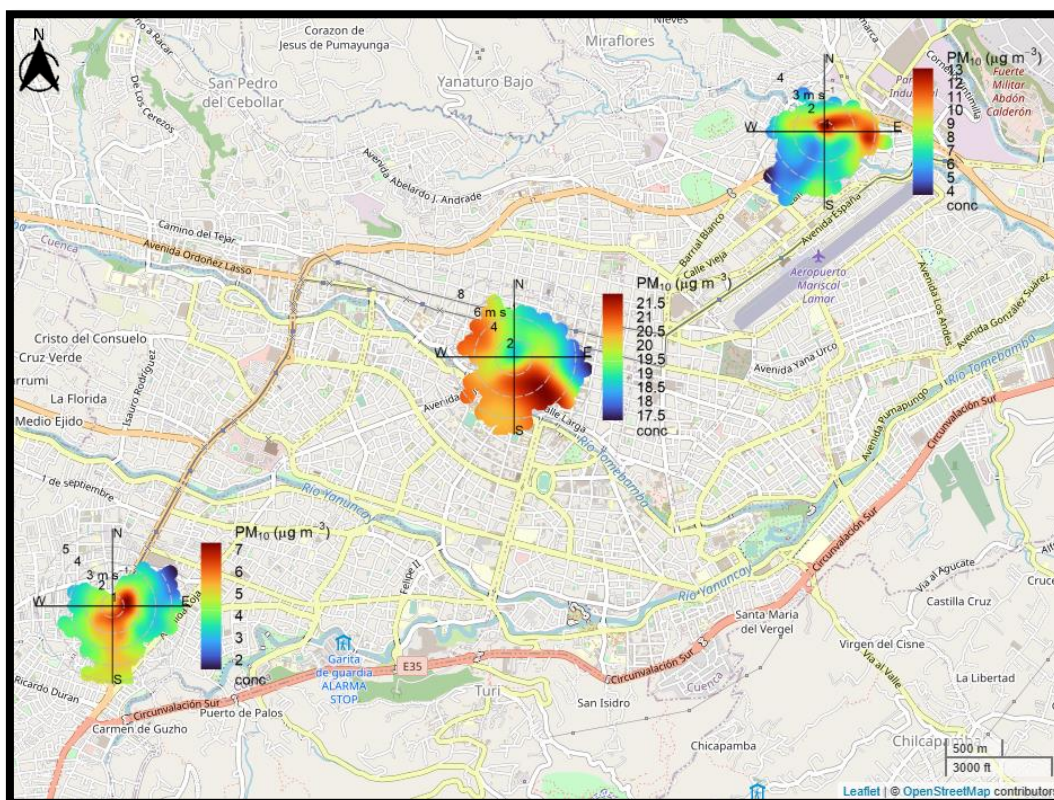
El comportamiento del O₃ claramente indica que sus concentraciones mayores fueron cuando los vientos provienen del este a velocidades de 5 m/s. No presentan altas concentraciones en el origen a velocidades de viento en calma. Por otro lado, el NO₂ en la estación EIE, tiende a presentar elevadas concentraciones cuando este proviene del noreste a velocidades de 1 a 3 m/s.

4.4.3. Mapas con gráficos polares por estación

El análisis espacial de cuatro contaminantes criterio mediante gráficos polares bivariados se encuentra representado en los mapas a continuación, cabe resaltar que los diagramas polares corresponden a las estaciones EIE, MUN y CCA en orden ascendente y diagonal del gráfico.

Figura 26:

Representación espacial de los gráficos polares de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) año 2022



Nota. Elaboración propia.

El análisis de la Figura 26 en primera instancia, corresponde a comparar la calidad del aire en las diferentes estaciones, por lo cual resalta, la estación MUN con concentraciones más altas de MP_{10} que las estaciones EIE y CCA, con una media de MP_{10} igual a 21,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para el año 2022.

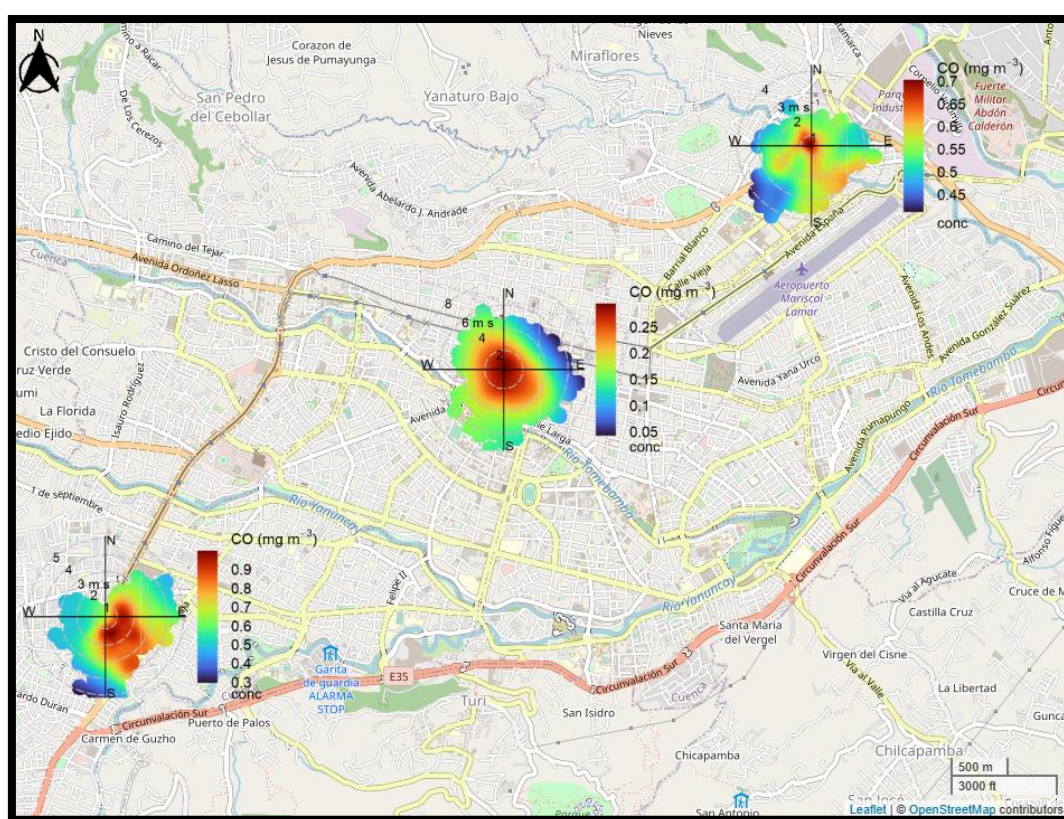
Por lo que, se puede inferir que el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca, tiene mayores concentraciones de este contaminante a comparación de las otras dos.

El mapa también permite inferir sobre las posibles fuentes de contaminación tanto local como regional, siendo el caso que la estación EIE y MUN tiene una influencia directa de los vientos provenientes de los cuadrantes SE y SO.

De igual manera, el mapa nos permite identificar que en la estación CCA, la calidad del aire está en función de la influencia directa del parque industrial como fuente local, puesto que las altas concentraciones de MP_{10} , provienen del E en un rango de velocidad de 1 a 3 m/s indicando una fuente local de contaminación.

Figura 27:

Representación espacial de los gráficos polares de CO (mg/m^3) año 2022



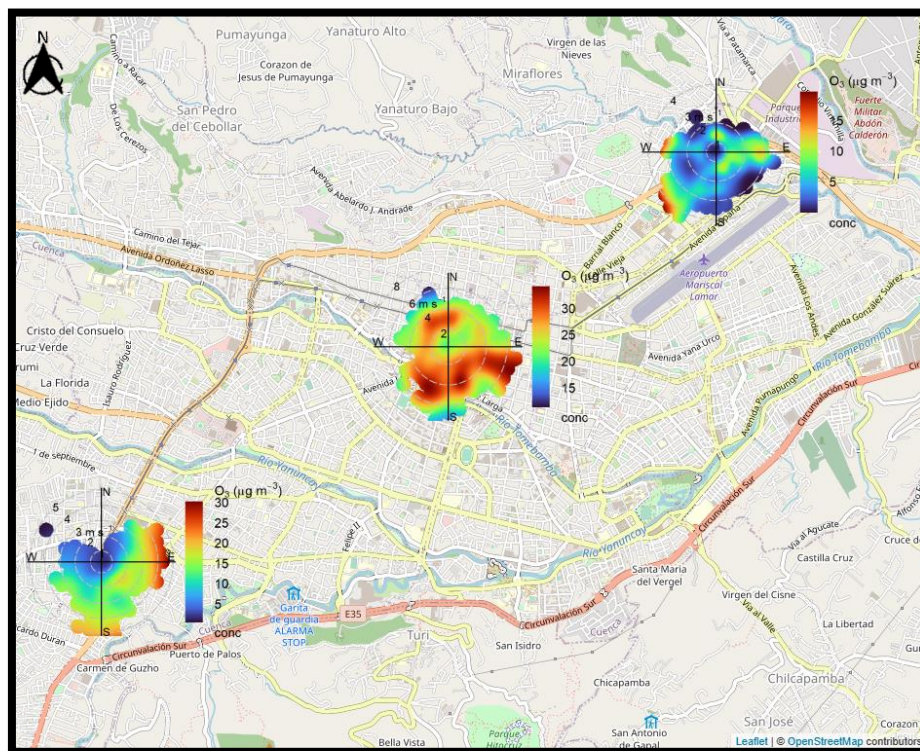
Nota. Elaboración propia.

La calidad del aire en las tres estaciones representadas en el mapa, indican que el comportamiento del CO en todas las estaciones está muy localizado a la zona. Por lo que se podría inferir que la fuente es puntual, sin embargo, la estación EIE tiene una tendencia marcada por la dirección proveniente del SE en un rango de velocidad de 1 a 3 m/s, por tanto, se señala el eje vial correspondiente a la Av. Loja y circunvalación sur como posibles fuentes para el CO, en esa estación.

De igual forma, la estación EIE presenta tener mayores concentraciones de CO respecto a su media que las otras estaciones; por ende, la zona del control sur tiene mayores concentraciones de este contaminante respecto a las otras áreas de estudio.

Figura 28:

Representación espacial de los gráficos polares de O₃ (µg/m³) año 2022



Nota. Elaboración propia.

Respecto a la Figura 28, en el Centro Histórico, el ozono tiene una distribución correspondiente a sus concentraciones altas, en dos cuadrantes principalmente tanto el SO como el SE. Mientras que, la estación EIE tiene una influencia marcada de los vientos provenientes del E, además ambas estaciones presentan medias iguales de 30 µg/m³.

Por lo cual, se puede inferir que las concentraciones de ozono tanto en el sur como en el centro de la ciudad fueron similares durante el 2022. Por el contrario, la zona norte de la ciudad se ve influenciada por concentraciones altas cuando los vientos provienen del SO, a altas velocidades señalando una fuente lejana.

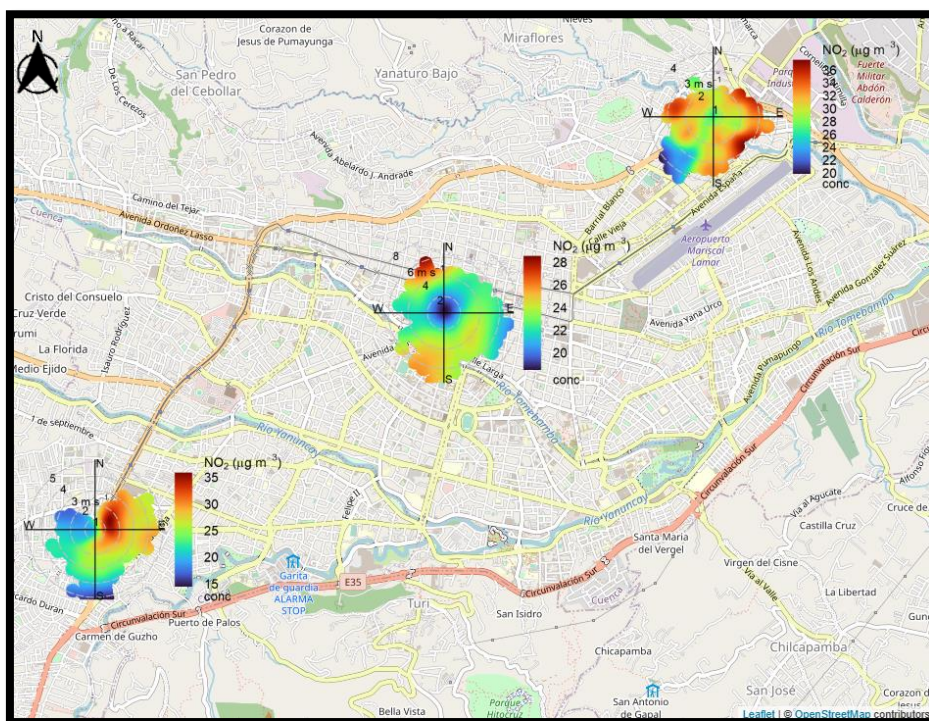
Para el análisis de NO₂ en la Figura 29, se aprecia una similitud en las concentraciones de este contaminante tanto al Sur como al Norte de la ciudad. En ambas zonas la calidad del aire respecto a este contaminante se ve influenciada por las direcciones provenientes de los

cuadrantes NE y NO respectivamente. Por ende, se infiere que el eje vial correspondiente a la Av. de las Américas influye en las concentraciones altas de este contaminante debido al tráfico vehicular.

De igual manera, la estación ubicada en el Centro Histórico señala que las concentraciones altas de este contaminante provienen de una fuente regional en dirección NO a la estación, para altas velocidades de viento, indicando de igual forma la influencia de la Av. de las Américas. Por otro lado, en la zona norte el gráfico polar indica la influencia del parque industrial como fuente local, para las concentraciones altas en este vecindario.

Figura 29:

Representación espacial de los gráficos polares de NO₂ (µg/m³) año 2022



Nota. Elaboración propia.

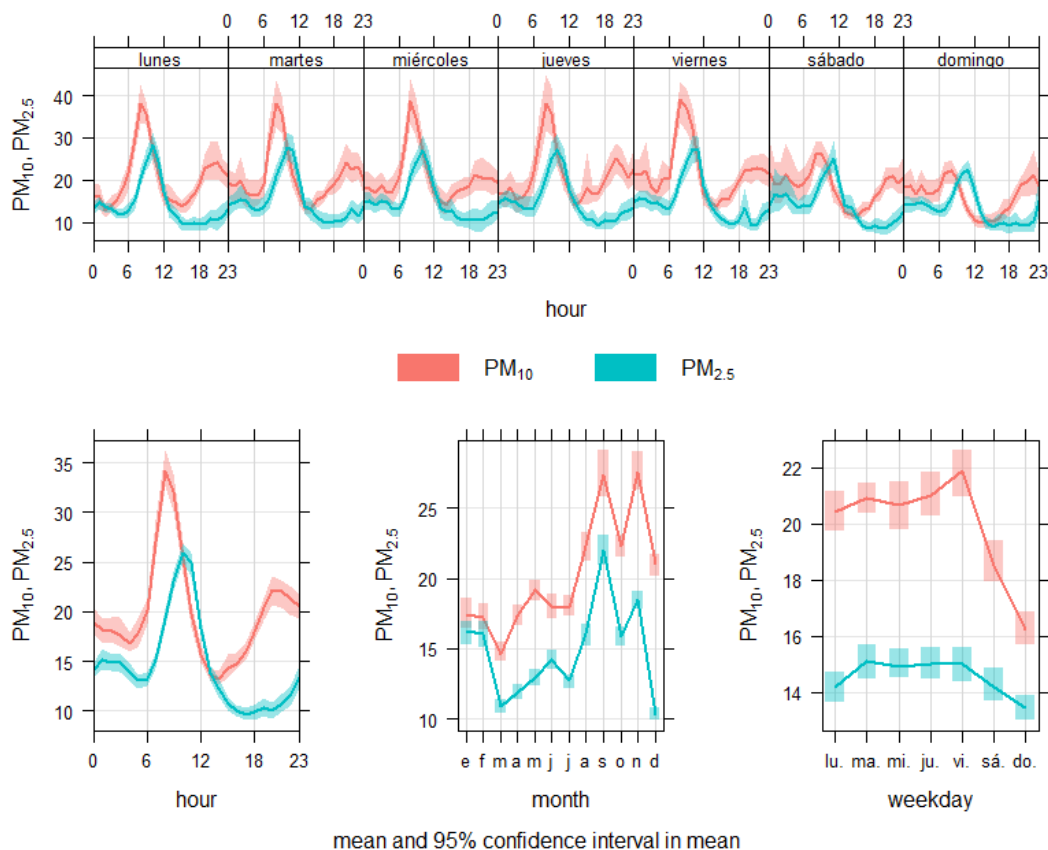
4.5. Variaciones temporales

La Figura 30 muestra la variación en la concentración promedio del MP₁₀ y MP_{2.5} (µg/m³) en la estación MUN monitoreados por analizadores automáticos (II) durante el 2022, por hora, día de la semana y mes.

La Figura 31 representan la variación temporal de las concentraciones promedio de CO (mg/m³), para la misma estación. Por otra parte, en la Figura 32 se junta tanto el O₃ como el NO₂ ambos en (µg/m³), para ver su variación en diferentes escalas temporales.

Figura 30:

Variación en las concentraciones promedio de MP₁₀ y MP_{2.5} (µg/m³) estación MUN por (II)



Nota. Elaboración propia. El gráfico superior indica una combinación entre días de la semana y hora de día, los gráficos de la parte inferior representan la variación horaria, mensual y por día de la semana.

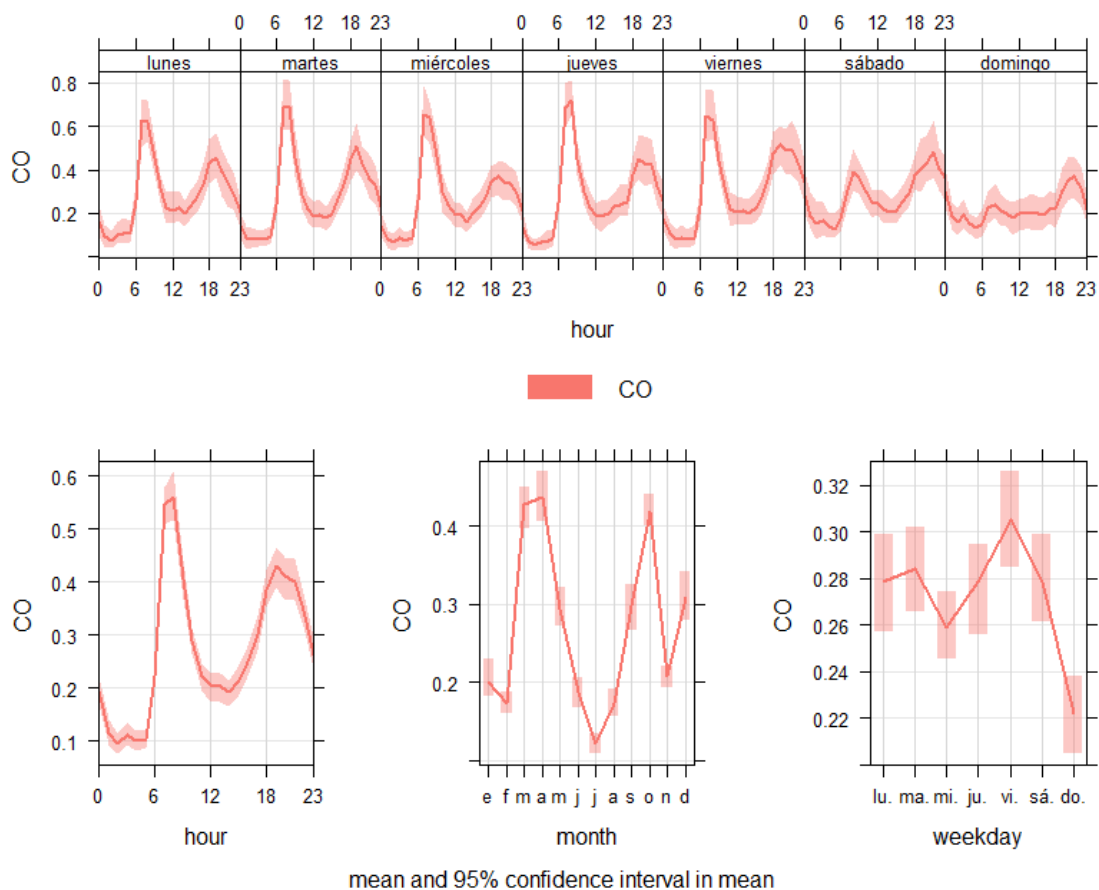
La Figura 30 resalta un patrón distinguido con elevadas concentraciones tanto de MP₁₀ y MP_{2.5} en los horarios entre 6H00 a 9H00 y 8H00 a 11H00 respectivamente, durante los días de laborales de la semana, mientras que sábado y domingo disminuye sus concentraciones. También se puede notar un ligero incremento en sus concentraciones en los horarios entre las 18H00 a 21H00.

Por otra parte, considerando las medias mensuales de los contaminantes, los meses de septiembre y noviembre son los de mayor concentración, mientras que el mes de marzo fue

el de menor concentración. En la misma sintonía hay un elevado pico de concentración promedio durante el 2022 para los días viernes, con respecto a MP_{10} .

Figura 31:

Variación en las concentraciones promedio de CO (mg/m^3) estación MUN por (II)



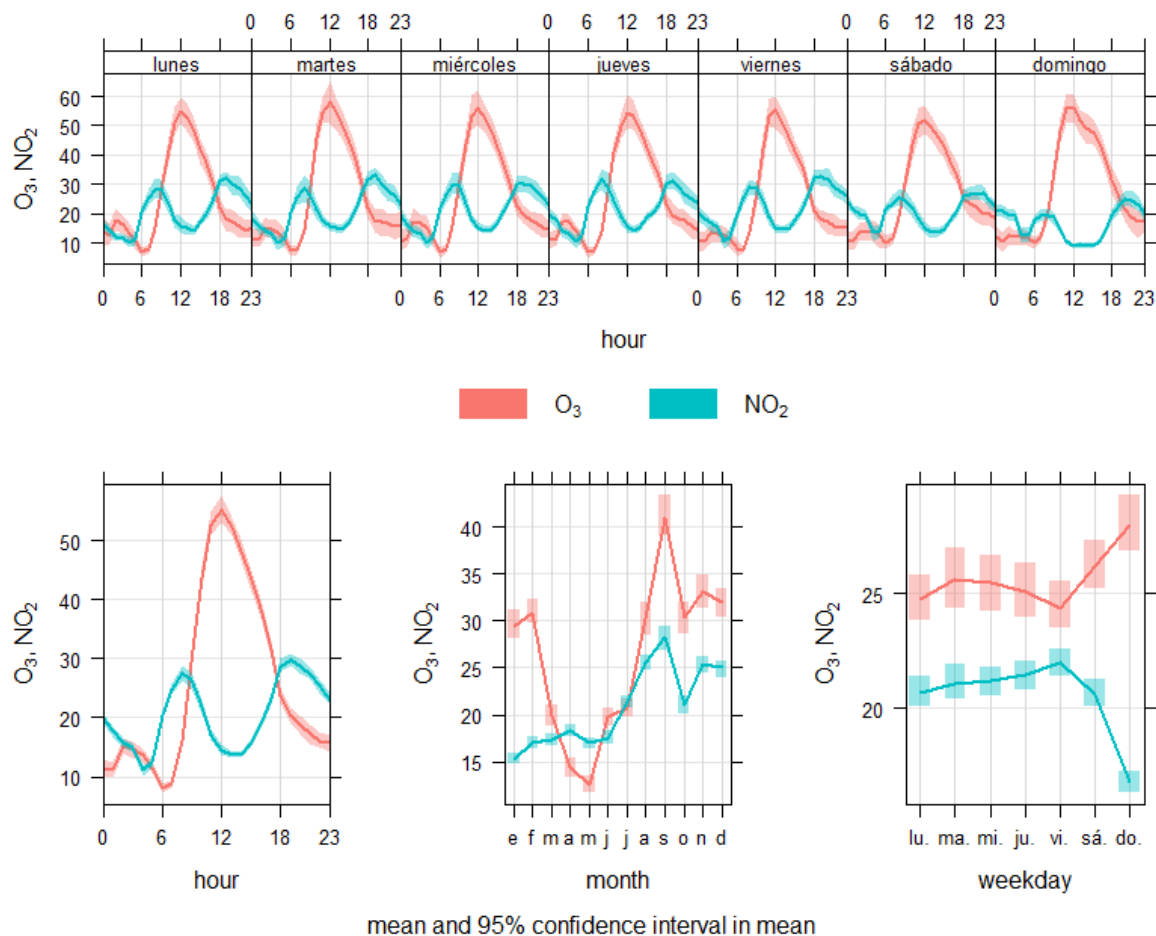
Nota. Elaboración propia.

El CO aumenta durante los días laborales de la semana y disminuye los fines de semana, sin embargo, es notorio el patrón de crecimiento en sus concentraciones durante las 6H00 y 9H00 por la mañana, de igual manera de 18H00 a 21H00 en la noche, durante todos los días de la semana.

Además, el CO aumenta entre marzo y abril, pero disminuye drásticamente entre junio y agosto, a partir donde se incrementa hasta el mes de octubre. Por último, el gráfico de variación respecto al día de la semana sobresale el pico de concentración para el día viernes del año 2022.

Figura 32:

Variación en las concentraciones promedio de O_3 y NO_2 ($\mu g/m^3$) estación MUN por (II)



Nota. Elaboración propia.

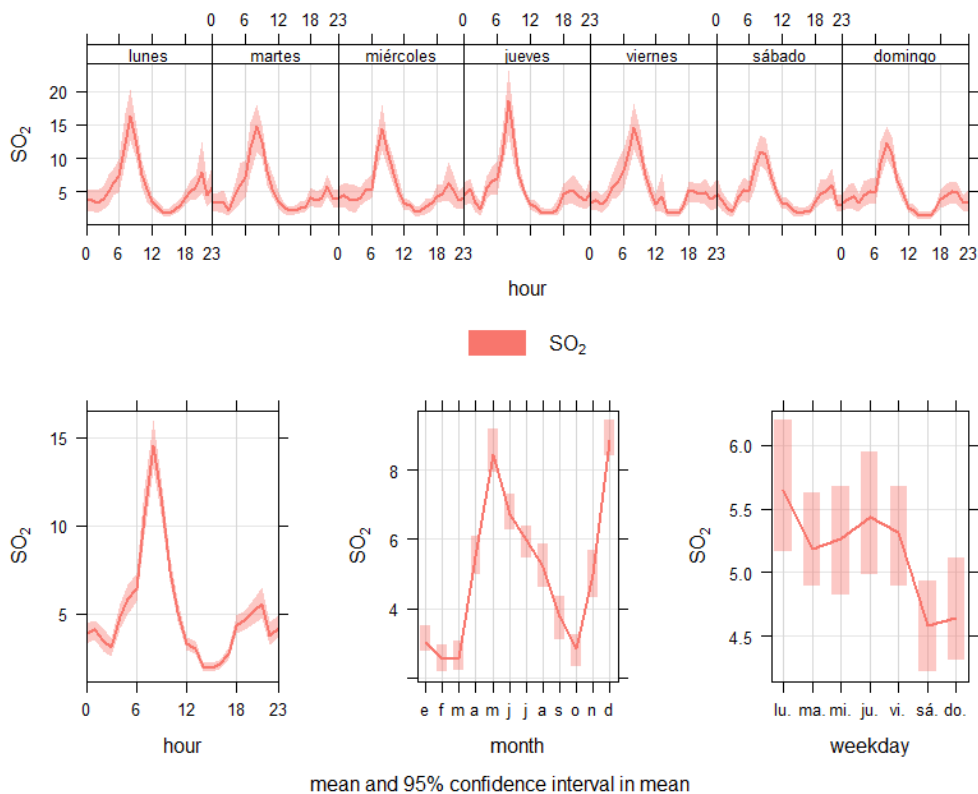
La variación entre hora y día de la semana para las concentraciones medias de O_3 y NO_2 es constante, puesto que, las horas de medio día entre 11H00 a 13H00 son picos máximos para O_3 , donde se tiene la mayor cantidad de radiación solar. Mientras que, a las mismas horas estas concentraciones son bajas para NO_2 .

De la misma, forma se registran picos en horas de 7H00 a 9H00 y 18H00 a 20H00 para NO_2 , mientras que, en las mismas horas la concentración de O_3 son mínimas.

Los meses de abril y mayo decrece las concentraciones de O_3 , pero aumenta fuertemente entre agosto y septiembre tanto para NO_2 como O_3 . En la variación diaria resalta el incremento en las concentraciones de NO_2 durante los días laborables, pero disminuye fuertemente los fines de semana, no es el caso del O_3 el cual aumenta los fines de semana.

Figura 33:

Variación en las concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) estación MUN por (II)



Nota. Elaboración propia.

El gráfico combinado de días de la semana y hora del día, presentan variaciones de SO₂, con crecimiento en sus concentraciones entre las 6H00 y 9H00 durante todos los días de la semana, además se aprecia que las concentraciones son menores los fines de semana.

La variación mensual indica que los meses de abril y mayo aumentan las concentraciones, mientras que, disminuye fuertemente durante los meses de septiembre y octubre para volver crecer durante el mes de diciembre. La variación diaria refleja que los días lunes son los de mayor concentración, mientras que los sábados y domingos disminuyen sus concentraciones.

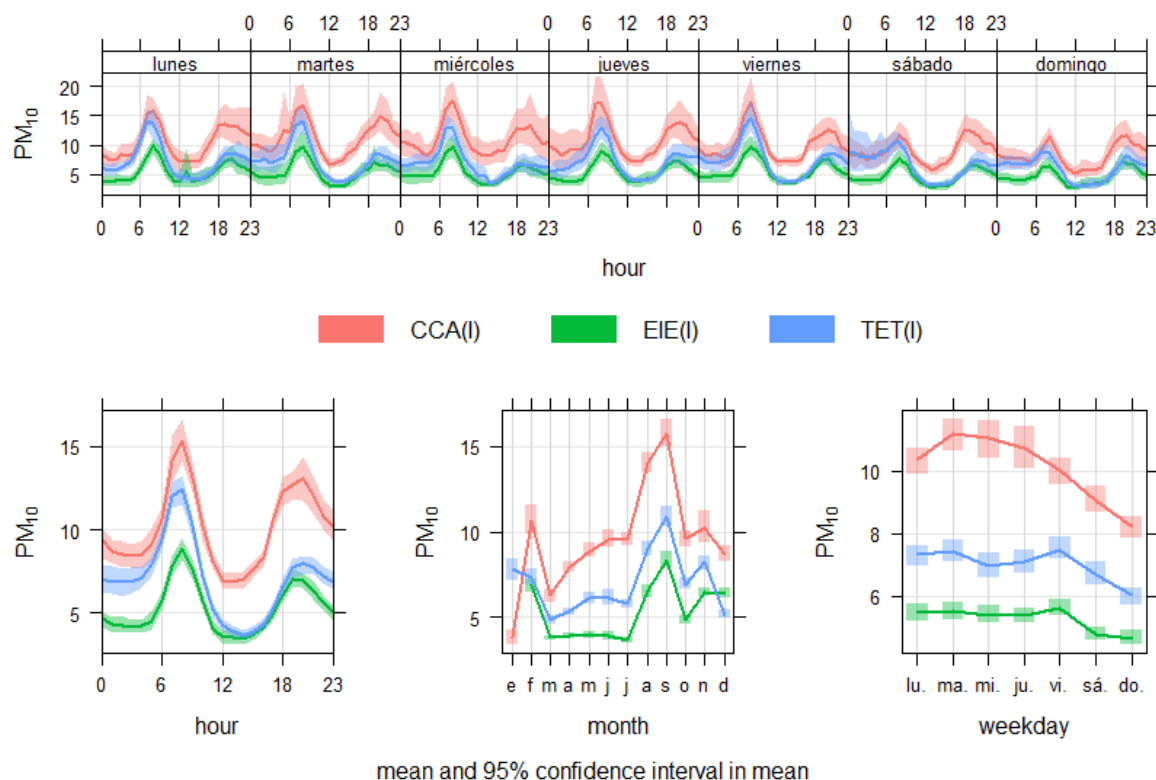
Por otra parte, considerando las variaciones temporales de los contaminantes criterio monitoreados por microsensores (I), se realiza una comparación entre las estaciones CCA, EIE y TET. Las estaciones donde se aprecia diferencias distinguidas en sus gráficas respecto a las concentraciones promedio, son considerados para el análisis de este capítulo, las demás se puede encontrar en el Anexo 3.

La Figura 34 indica la variación temporal de las concentraciones de MP₁₀ en las estaciones CCA, EIE y TET, monitoreadas por microsensores (I). Las variaciones de MP_{2.5} tienen los

mismos patrones que las variaciones de MP_{10} , en unidades más bajas, la figura se encuentra en el Anexo 3 Figura 59. También se recalcan que las variaciones de O_3 medidas en las tres estaciones, son iguales a los patrones medidos de la estación MUN a escala urbana representados en la Figura 62 del Anexo 3.

Figura 34:

Variación horaria, mensual y diaria de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)



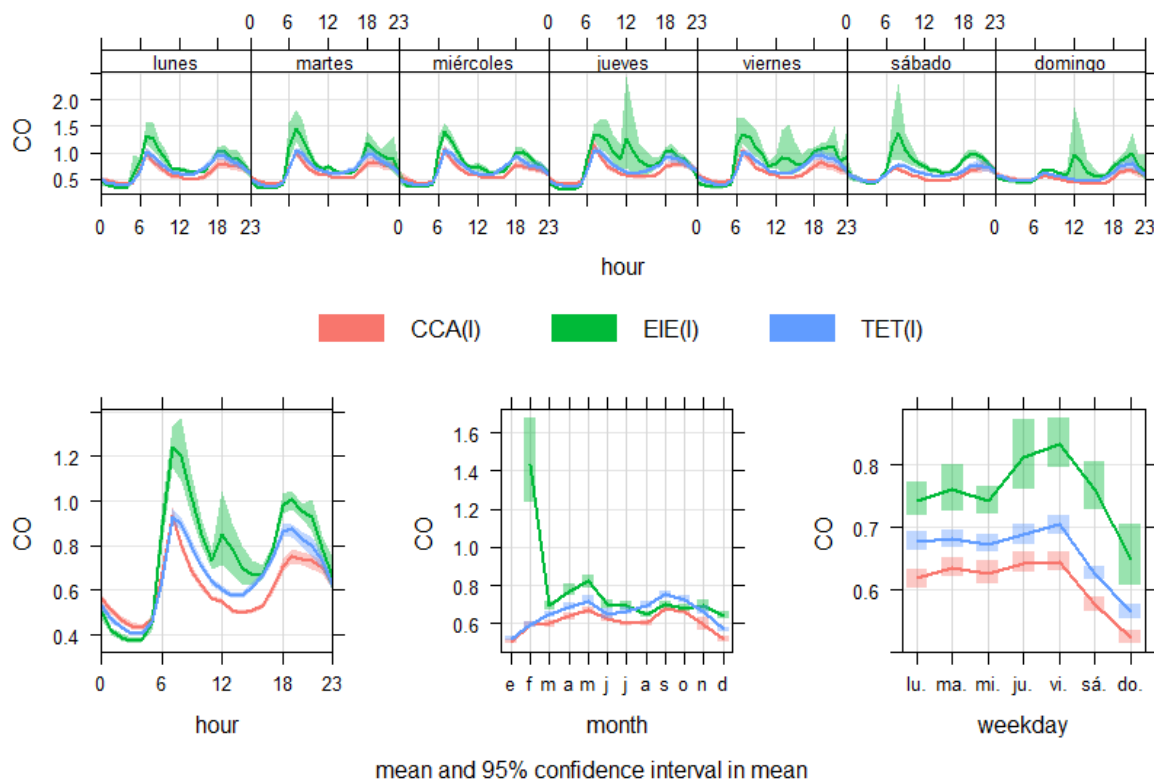
Nota. Elaboración propia. Las variaciones corresponden a las concentraciones promedio del contaminante.

Las variaciones en las concentraciones promedio de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), monitoreadas por microsensores sobresale la estación CCA al presentar mayores concentraciones respecto a EIE y TET. Además, se aprecia un pico en sus concentraciones en las tres estaciones en un horario de 7H00 a 9H00 am, y también de 18H00 a 20H00, lo que sugiere podría ser las horas pico de tráfico vehicular en la ciudad.

En cuanto a la variación mensual se aprecia que en las tres estaciones se registra un incremento en las concentraciones de MP_{10} en el mes de septiembre. Por otra parte, también se aprecia una disminución importante en las concentraciones en las tres estaciones los fines de semana.

Figura 35:

Variación horaria, mensual y diaria de CO (mg/m³) estaciones CCA, EIE y TET por (I)



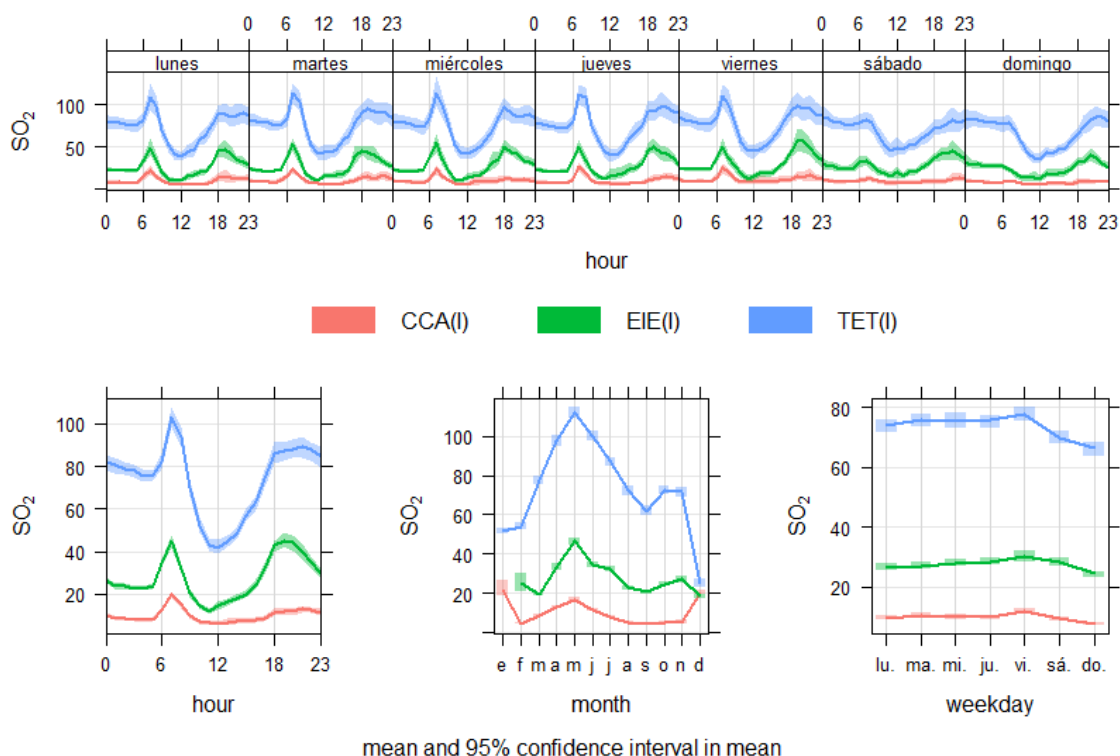
Nota. Elaboración propia. Las variaciones corresponden a las concentraciones promedio del contaminante.

Respecto a la variación de las concentraciones de CO en las tres estaciones monitoreadas, destaca la estación EIE con mayores concentraciones a comparación de EIE y TET. En el mismo sentido, existe un patrón en la variación horario para las tres estaciones, habiendo picos en un horario de 7H00 a 9H00, y también de 18H00 a 20H00.

La variación mensual indica un aumenta en las concentraciones durante el mes de mayo para el CO, sin embargo, se aprecia un pico en el mes de febrero en la estación EIE. Por último, en cuanto a la variación diaria, se aprecia un descenso en las concentraciones los fines de semana.

Figura 36:

Variación horaria, mensual y diaria de SO₂ (µg/m³) estaciones CCA, EIE y TET por (I)



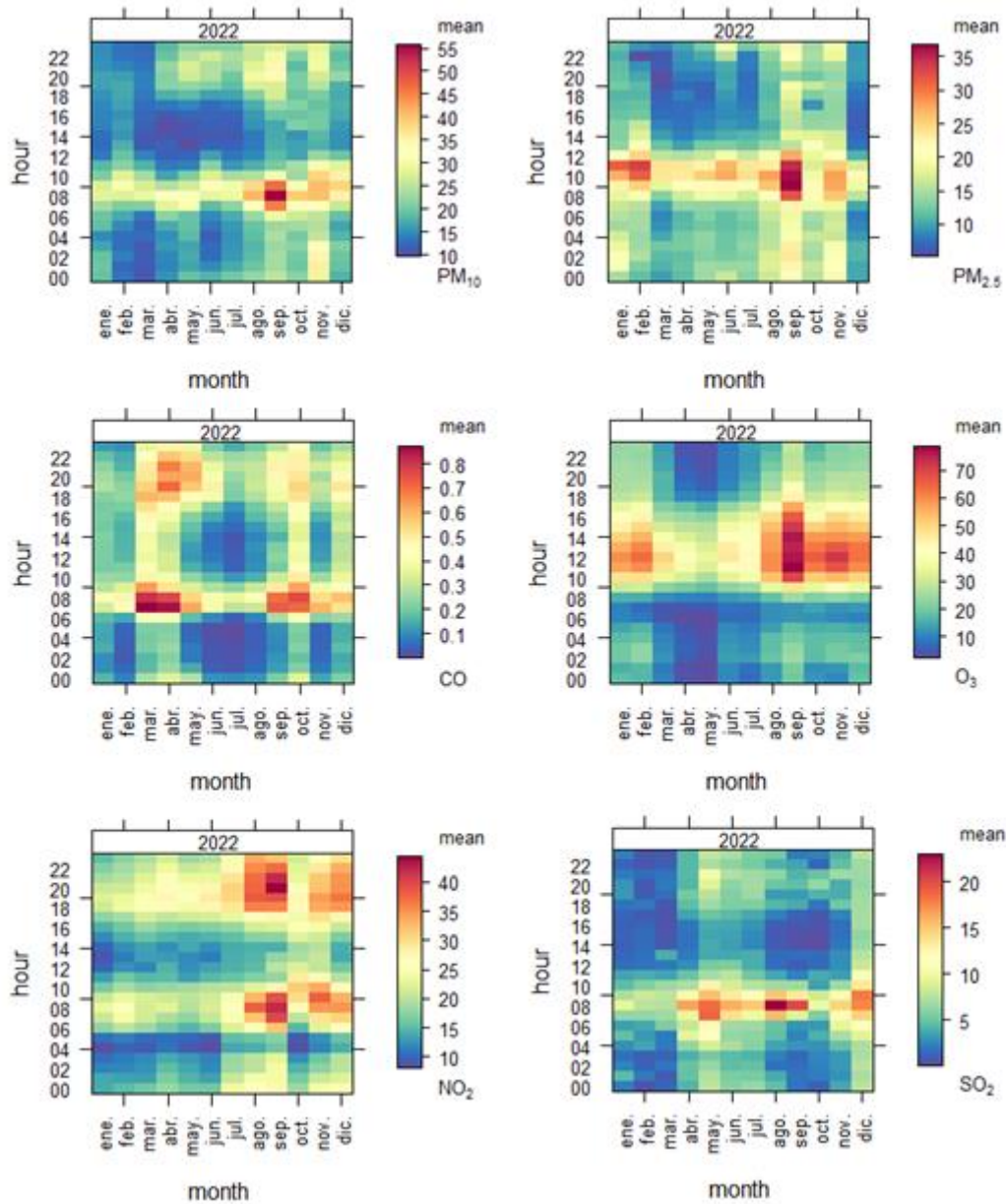
Nota. Elaboración propia. Las variaciones corresponden a las concentraciones promedio del contaminante.

Finalmente, tomando el criterio indicativo de contaminación que tienen los microsensors, la Figura 36 sobresale las concentraciones de SO₂ en la estación del terminal terrestre, muy por encima de los niveles de las estaciones CCA y EIE. De igual forma, se repite el patrón en los picos de concentración en las tres estaciones en un horario de 7H00 a 9H00 am, y también de 18H00 a 20H00. Finalmente, la variación mensual indica que el mes de mayo hubo un aumento en las concentraciones de este contaminante en las tres estaciones monitoreadas por microsensors. Por último, la variación diaria indica que los fines de semana disminuyen las concentraciones de este contaminante en todas las estaciones.

Las Figuras 37 y 38 fueron creadas gracias a la herramienta “trendLevel” del paquete “Openair” de RStudio, de esta manera, para este capítulo de resultados se exponen los mapas de calor para la estación MUN monitoreada por analizadores automáticos (II), mientras que para la estación EIE y CCA, se encuentran en el apartado de anexos.

Figura 37:

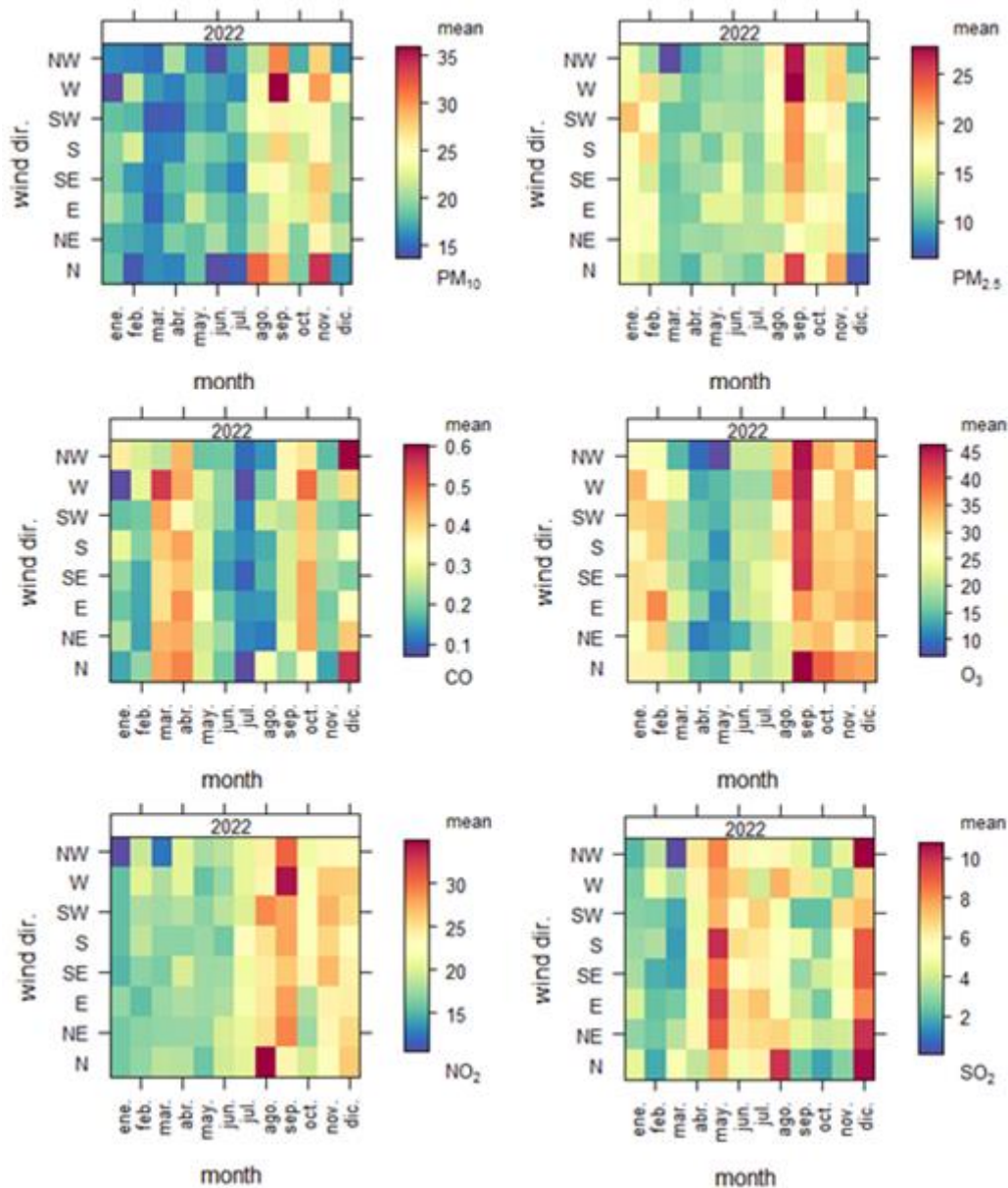
Mapas de calor por hora del día estación MUN por (II)



Nota. Elaboración propia.

Figura 38:

Mapas de calor por dirección del viento estación MUN por (II)



Nota. Elaboración propia.

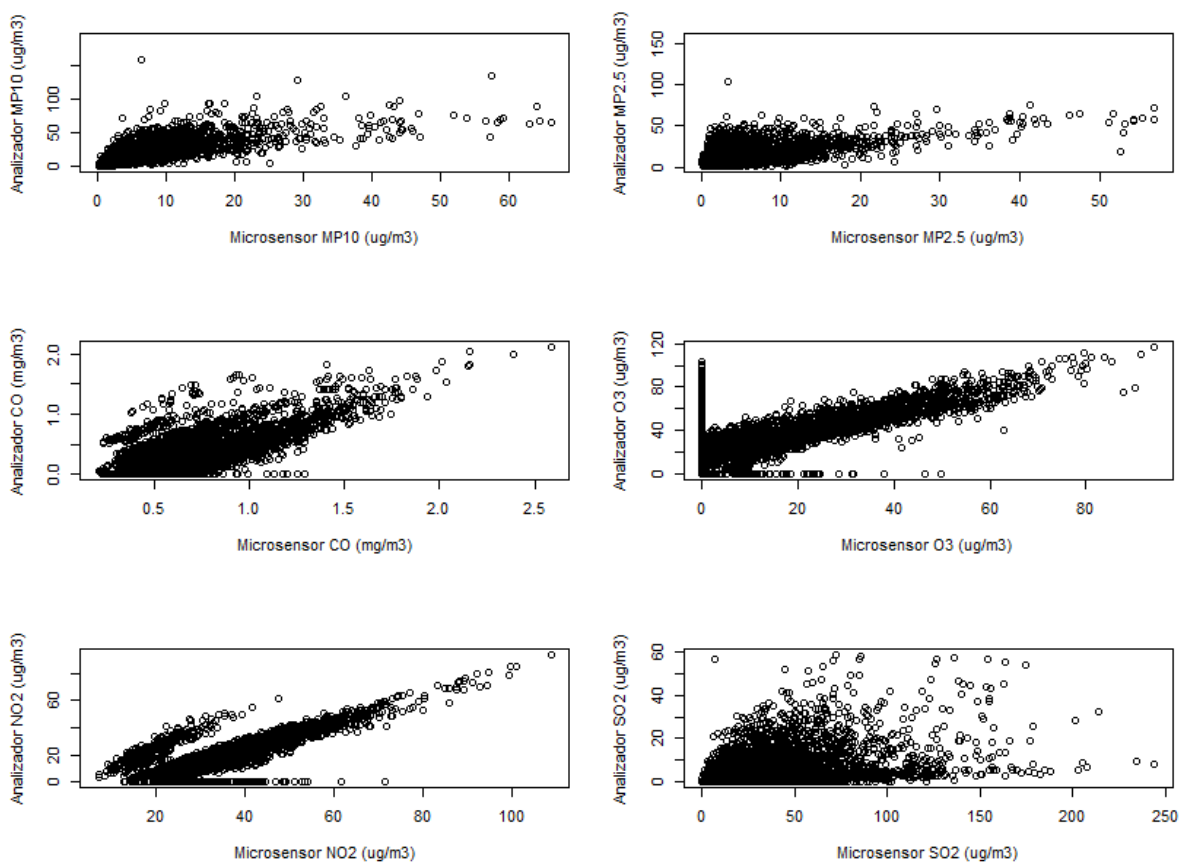
En síntesis, el mes de septiembre del año 2022, registra las mayores concentraciones de los contaminantes criterio, principalmente de material particulado inferior a 10 y 2.5 micras, así como de ozono, proveniente de todas las direcciones. Así también, las concentraciones altas de CO y SO₂ fueron en un horario de 8H00 a 10H00, varios meses del año en diferentes direcciones, Por su parte, las concentraciones altas de NO₂ fueron en los meses de agosto y septiembre en dos horarios principalmente de 7H00 a 10H00 y de 18H00 a 9H00, predominantemente del cuadrante de dirección NO.

4.6. Análisis de regresión y correlación estación MUN

El análisis de regresión y correlación sobre las metodologías microsensor (I) y analizador automático (II), comienza por explorar los datos en base a diagramas de dispersión. El propósito e importancia de estos gráficos radica en determinar la relación existen entre ambas metodologías. La Figura 39 muestra la dispersión en las concentraciones de seis de los contaminantes criterio monitoreados en la estación MUN.

Figura 39:

Diagramas de dispersión de los contaminantes criterio monitoreados por (I) y (II)



Nota. Elaboración propia.

Las metodologías para la determinación de material particulado, a simple vista no guardan relación alguna o correlación entre ambas. Al igual que, no se visualiza una relación entre las metodologías para la medición de SO₂, en ambos casos se aprecia un abanico en su dispersión y no una distribución uniforme de los datos. Por su parte, los gráficos de dispersión para la determinación de CO y NO₂ no se visualiza una relación clara o distinguida entre sus

metodologías de medición. Sin embargo, el gráfico de dispersión entre las metodologías para la determinación de ozono, si se puede notar una relación positiva y lineal entre ambas.

Por otro lado, se aplicó pruebas de normalidad de Lilliefors por separado a cada serie de datos mediante el software RStudio para los seis contaminantes criterio monitoreados por ambas metodologías. Dando como resultado valores de p_value inferiores a $2.2e^{-16}$, lo cual nos indica que los datos no siguen una distribución normal, ya que el valor es inferior al nivel de significancia (0,05); como se observa en la Tabla 15.

Tabla 15:

Resumen de pruebas de normalidad

MP ₁₀		O ₃	
(I)	p-value < $2.2e^{-16}$	(I)	p-value < $2.2e^{-16}$
(II)	p-value < $2.2e^{-16}$	(II)	p-value < $2.2e^{-16}$
MP _{2.5}		NO ₂	
(I)	p-value < $2.2e^{-16}$	(I)	p-value < $2.2e^{-16}$
(II)	p-value < $2.2e^{-16}$	(II)	p-value < $2.2e^{-16}$
CO		SO ₂	
(I)	p-value < $2.2e^{-16}$	(I)	p-value < $2.2e^{-16}$
(II)	p-value < $2.2e^{-16}$	(II)	p-value < $2.2e^{-16}$

Nota. Elaboración propia.

En tanto a la evaluación de la correlación, la Figura 40 representa una matriz de correlación por el método de “Spearman”, en donde se aprecia el coeficiente de correlación rho en la diagonal, resaltando la relación existen entre metodologías, siendo (I) microsensores y (II) analizadores automáticos.

Figura 40:

Matriz de correlación de “Spearman”



Nota. Elaboración propia.

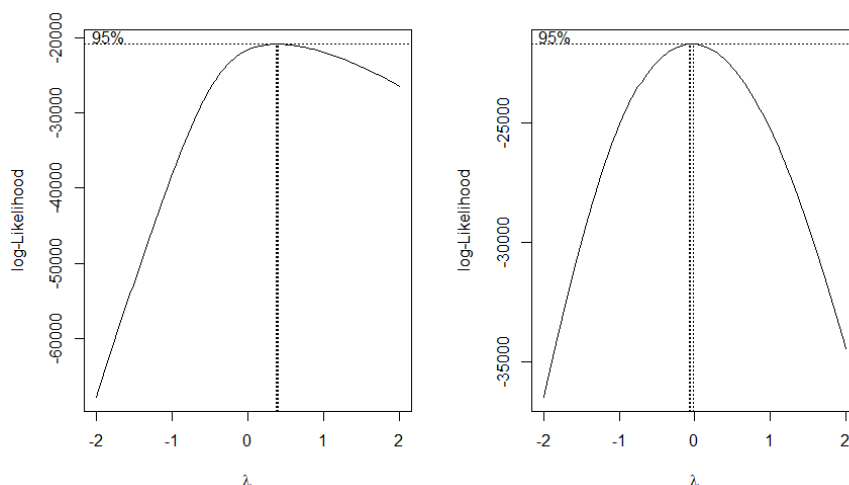
Las relaciones monótonas calculadas por el método de “Spearman” proporcionan una medida cuantitativa entre las variables de análisis. Además, evalúa la relación y fuerza en las relaciones sin asumir una forma específica de relación lineal. De esta manera, la matriz resalta el coeficiente de correlación igual a 0.90 obtenido para la determinación de O₃, el cual indica tener una relación positiva perfecta al acercarse a 1 entre ambas metodologías (I) y (II). Al igual que, se considera significativas las relaciones monótonas existentes entre MP₁₀, CO y NO₂ con coeficiente superiores a 0.70, indicando haber una relación moderada a fuerte. Por el contrario, no existe una relación para la determinación de MP_{2.5} y SO₂, respecto a sus metodologías.

4.7. Valores de lambda

Por medio del software estadístico RStudio y la librería “MASS”, se calcularon los valores de lambda entre -2 a 2, para ambas series de datos. La Figura 41, muestra la función “Log-Likelihood”, en la cual se aprecia el valor de lambda que maximiza la función.

Figura 41:

Función log de máxima verosimilitud para valores de lambda



Nota. Elaboración propia. Los valores óptimos de lambda que maximizan la función, fueron para la variable dependiente $\lambda = 0,38$ (ver gráfica a la izquierda); mientras que el valor de lambda óptimo para la variable independiente $\lambda = -0,06$ (ver gráfica a la derecha).

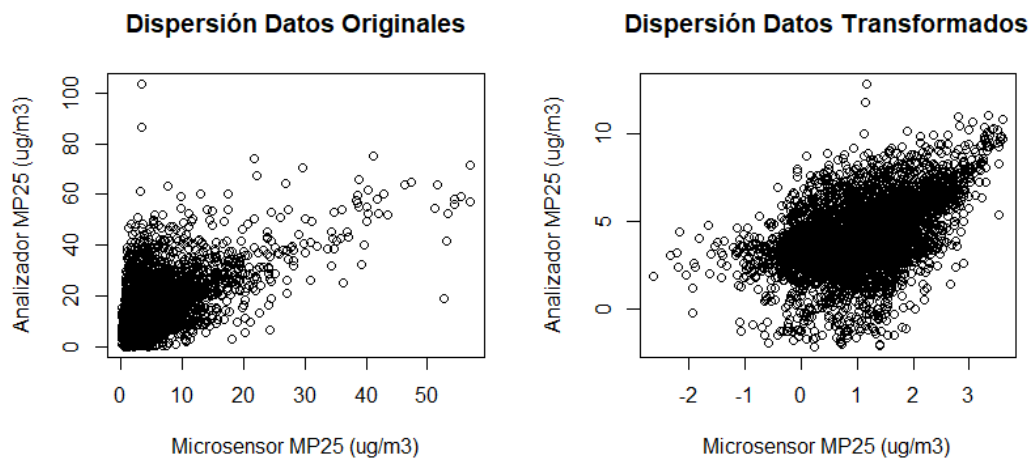
4.8. Evaluación de la transformación Box – Cox

La validación de las variables transformadas implica evaluar la relación de los datos pareados, con la intención de construir un modelo de regresión lineal donde se ajuste la variable predictora a la variable respuesta. Por ende, la Figura 42 muestra la dispersión de los datos pareados antes y después de la transformación. Al igual que la Figura 43, donde se visualiza el q-qplot para ambas series de datos antes y después de la transformación.

Por otra parte, las pruebas aplicadas a ambas series de datos tanto la normalidad como el coeficiente de correlación de “Spearman” se encuentra, resumidas en la Tabla 16. Finalmente, en el Anexo 4 se puede encontrar las curvas de densidad para ambas series de datos.

Figura 42:

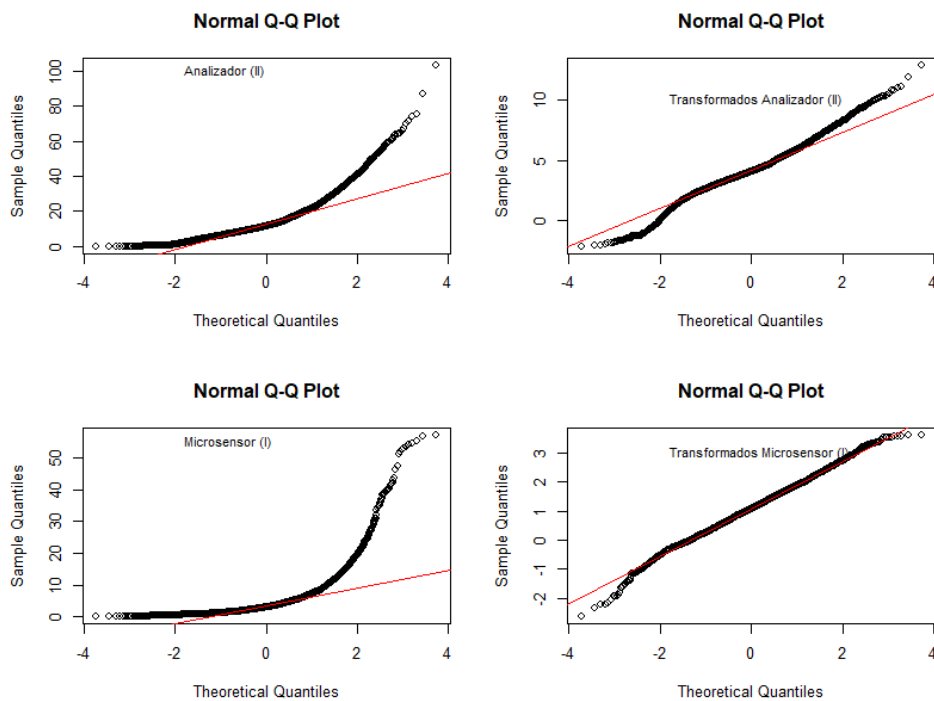
Dispersión de los datos antes y después de la transformación



Nota. Elaboración propia. En la Figura 42 se aprecia el diagrama de dispersión luego de transformar los datos, en la cual no se identifica una relación lineal o un patrón distinguido en su distribución.

Figura 43:

Gráficos Q-Q Plot antes y después de la transformación



Nota. Elaboración propia. Los gráficos q-qplot indican un ajuste a la distribución normal para cada serie de datos, donde se resalta la presencia de abundantes valores atípicos en ambos casos.

La Tabla 16 destaca el coeficiente de correlación de “Spearman” rho, indicando una magnitud de correlación igual a 0,44 lo que indica no haber una relación fuerte entre metodologías. Por otra parte, a las series de datos transformados, se aplicó pruebas de normalidad “Lilliefors”, dando como resultado que los datos transformados del contaminante MP_{2.5} monitoreado por un microsensor sugiere no rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribucional normal, mientras que se rechaza la hipótesis de normalidad para los datos transformados de MP_{2.5} monitoreados por un analizador automático.

Tabla 16:

Evaluación de datos transformados

Valores MP _{2.5} transformados	
(I)	p-value = 0,08822
(II)	p-value < 2.2e ⁻¹⁶
rho	0,44

Nota. Elaboración propia.

Una vez comprobado la ausencia de relación y normalidad entre las metodologías (I) y (II), se concluye que no es posible generar un modelo eficiente de regresión lineal simple para MP_{2.5}, que cumpla con el objetivo específico planteado en este análisis, para la estación MUN.

Sin embargo, como se mencionó en el capítulo IV “Metodología”, sección 4.4 “Análisis de regresión y correlación”, se generó un modelo de regresión lineal para las metodologías (I) y (II) que tengan una buena correlación de “Spearman”. Por lo cual se opta por ajustar un modelo de regresión lineal simple para las metodologías de monitoreo de O₃ en la estación MUN. Puesto que, tuvieron un coeficiente de correlación cercano a 1.

El modelo de regresión lineal fue ajustado utilizando 4 265 observaciones del conjunto de datos de ambas metodologías “O3 (I)” y “O3 (II)”. Los resultados del modelo se encuentran en la Tabla 17 y 18, a continuación:

Tabla 17:

Resumen del modelo de regresión lineal para Ozono

Variable	Estimación	Error estándar	Valor t	Valor p
Intercepto	15,6106	0,1651	94,55	< 2.2e ⁻¹⁶

O3 (I)	1,0488	0,0069	150,26	$< 2.2e^{-16}$
--------	--------	--------	--------	----------------

Nota. Elaboración propia.

Tabla 18:

Estadísticos del modelo

Estadístico	Valor
MSE	58,30
RMSE	7,64
R ²	0,8412

Nota. Elaboración propia.

Dentro del análisis de regresión lineal sobre los datos generados por las metodologías (I) y (II) para la determinación de O₃, se evaluó la relación entre la variable de respuesta “O3 (II)” y la variable predictora “O3 (I)” utilizando el conjunto de datos recopilados de la estación MUN. Dando como resultado un nivel de significancia alto para los coeficientes estimados, ya que los valores p_value fueron extremadamente pequeños $< 2.2e^{-16}$. Esto indica haber una relación altamente significativa entre las metodologías (I) y (II).

Por otro lado, los estadísticos calculados como el coeficiente de determinación R² fue de 0,8412, lo que indica que el 84,12 % de la variabilidad de la variable respuesta “O3 (II)”, puede ser explicada por la variable predictora “O3 (I)” en el modelo.

De igual manera, el error estándar residual indica que los valores observados por la variable de respuesta “O3 (II)” varían alrededor de la línea de regresión en aproximadamente 7,64 unidades.

4.9. Evaluación del modelo

Los resultados obtenidos al generar una validación cruzada con k=3, sirven para evaluar la capacidad predictiva del modelo de regresión lineal simple, generado para ajustar los datos entregados por el microsensor de O₃ al analizador automático de O₃ en la estación MUN. La Tabla 19 resume los cálculos realizados.

Tabla 19:

Evaluación del modelo de regresión lineal

Métrica Estadística	Valor
MSE modelo original	58,30
CV _(k) validación cruzada	666,82

Nota. Elaboración propia

El modelo original al presentar un MSE bajo indica que el modelo se ha ajustado bien con los datos entrenados. Sin embargo, al tener un MSE de la validación cruzada considerablemente mayor al del modelo original, esto indica que el modelo puede estar sobreajustado a los datos de entrenamiento y no generaliza bien a nuevos datos. Lo que significaría que el modelo puede tener un rendimiento deficiente en datos no vistos previamente, lo que afecta en su capacidad para hacer predicciones precisas en datos nuevos.

4.10. Excedencias en la NECA y OMS

La Tabla 20 muestra los valores del promedio aritmético anual para todos los analizadores automáticos (II), que monitorearon los diferentes contaminantes criterio y cumplieron el criterio de representatividad en cada estación.

Tabla 20:

Promedio anual estaciones monitoreadas por (II) durante el 2022

Estación	Contaminante	Valor	NECA (2011)	OMS (2005)	OMS (2021)
MUN	MP ₁₀	19,93	50	20	15
	MP _{2.5}	14,56	15	10	5
	SO ₂	5,15	60		
	NO ₂	20,54	40	40	10
CCA	MP _{2.5}	11,87	15	10	5
EIE	SO ₂	3,39	60		

Nota. Elaboración propia.

Referente al periodo de exposición a largo plazo, el valor promedio aritmético para todas las muestras monitoreadas por los diferentes analizadores, se resume en lo siguiente:

- El material particulado inferior a 10 micras no supera la NECA, sin embargo, si para los valores recomendados por la OMS tanto del 2005 como del 2021, en la estación MUN.
- Por otra parte, el material particulado inferior a 2.5 micras está muy cercano al valor límite estipulado por la NECA, sin embargo, no supera la misma, en su defecto, sí supera esta normativa de acuerdo a las recomendaciones de la OMS, tanto en la estación MUN, como la estación CCA.
- No se supera el valor límite nacional, referentes a la exposición a largo plazo de SO₂, en ninguna estación de monitoreo.

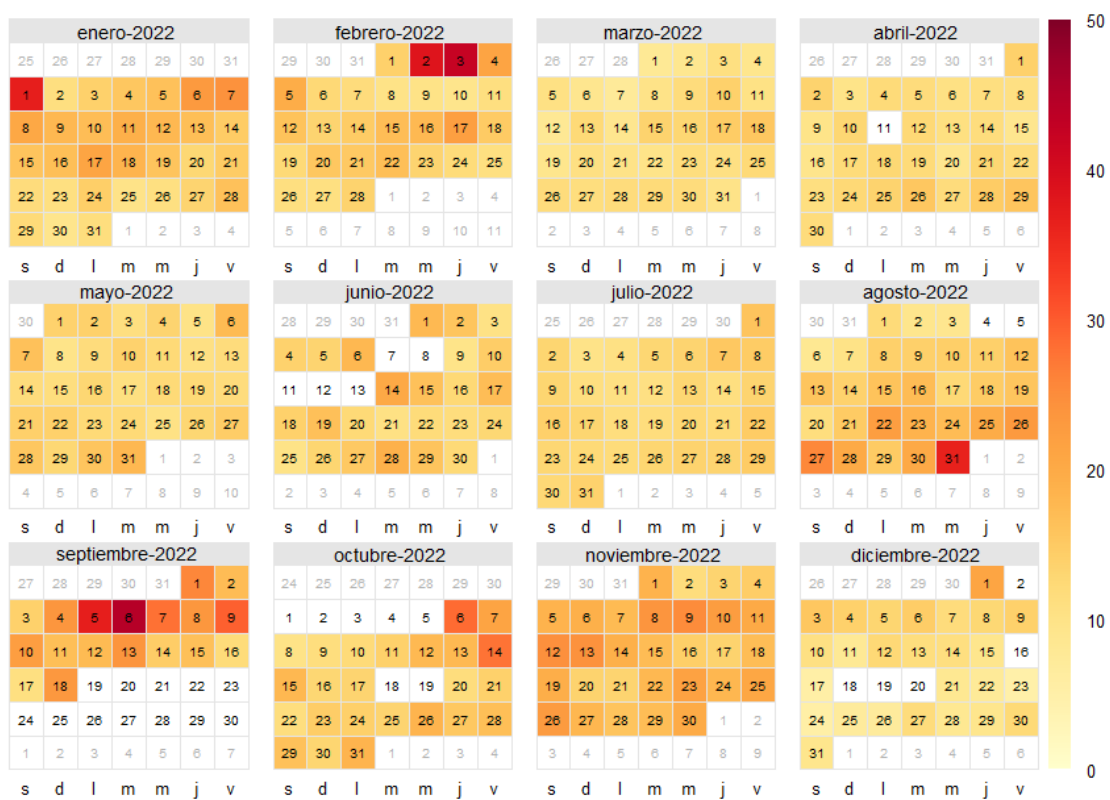
- Para el caso del NO₂, este si supera las recomendaciones de la OMS 2021, pero no la normativa nacional.

4.10.1. Calendarios de contaminación en 24 horas

La Figura 44 muestra el calendario de concentraciones de MP_{2.5} (promedios diarios) en la estación MUN, que fueron monitoreados por un analizador automático de material particulado (II).

Figura 44:

Calendario de concentración de MP_{2.5} durante el 2022 estación MUN



Nota. Elaboración propia. La Figura 44 muestra los días en los cuales se sobrepasó la norma estipulada de concentración promedio en 24 h para material particulado menor a 2.5 micras, en donde se resaltan los días de color rojo intenso, como aquellos donde su media diaria sobrepaso el valor de la NECA igual a 50 (µg/m³) en 24 horas.

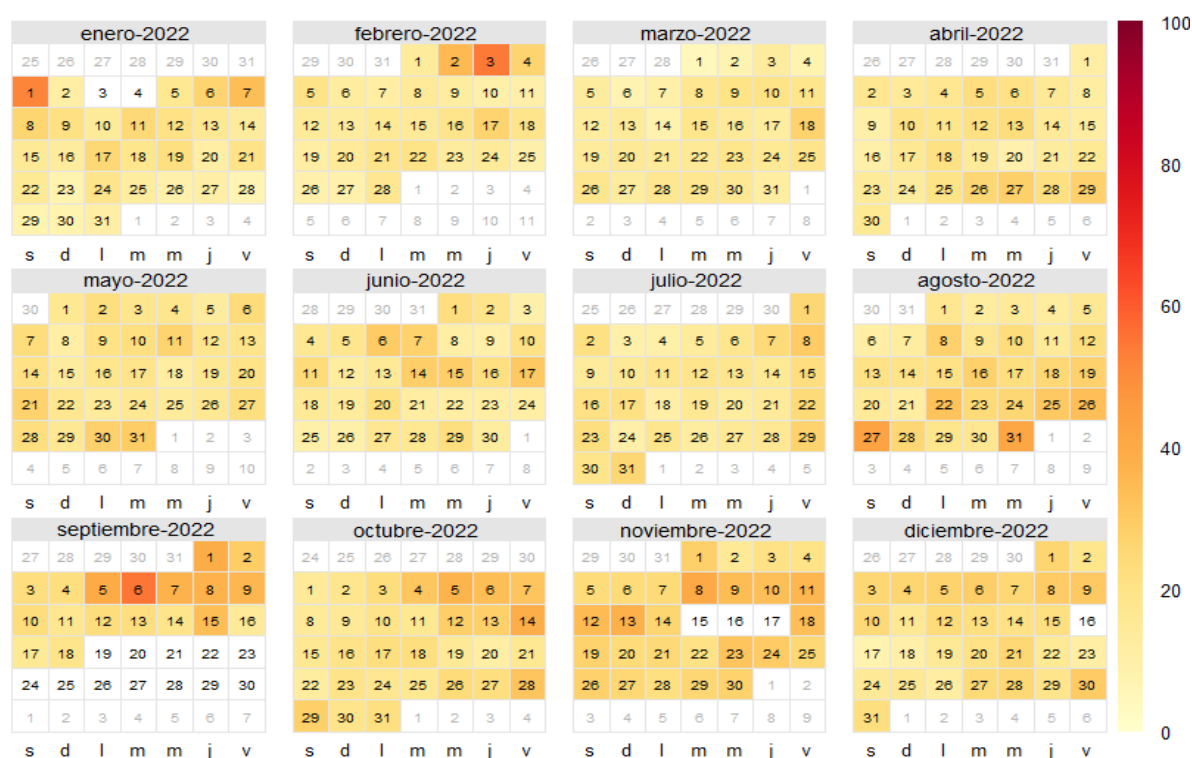
La Figura 44 indica que los días 1 de enero, 2 y 3 de febrero, 31 de agosto y finalmente, el 5 y 6 de septiembre están muy cerca del límite establecido por la NECA según la Tabla 4. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que durante estos días fueron significativos los niveles

elevados de concentración, pudiendo haber excedido la norma ecuatoriana de 50 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 24 horas en el corto plazo.

De igual manera, el calendario nos permite ver que hubo 32 días en los cuales no cumplieron el criterio de representatividad mayor al 75 %, o en su defecto el equipo estuvo inactivo por diferentes razones. Este mismo análisis se aplica para las Figuras 45, 46, 47 y 48 elaboradas en base a analizadores automáticos (II).

Figura 45:

Calendario de concentración de MP_{10} durante el 2022 estación MUN



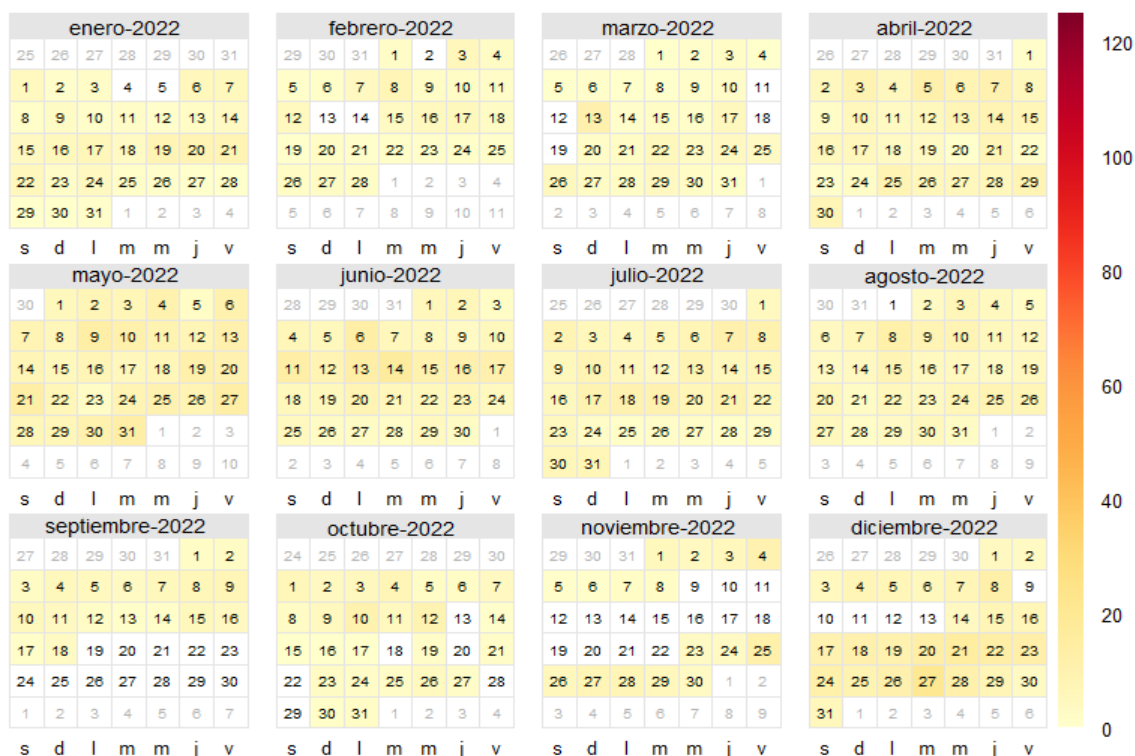
Nota. Elaboración propia.

La Figura 45 muestra los días en los cuales se sobrepasó la norma estipulada de concentración promedio en 24 h para material particulado menor a 10 micras. En donde se resaltan los días de color rojo intenso, como aquellos donde su media diaria sobrepasó el valor de la NECA igual a 100 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 24 horas.

Sin embargo, el presente calendario no refleja días donde se supere la normativa; puesto que los días con niveles de concentración elevados están cercanos a los 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Contrariamente al analizador de $MP_{2.5}$, la Figura 45 destaca un total de 18 días en los cuales no cumplieron los criterios de representatividad o en su defecto estuvieron inactivos.

Figura 46:

Calendario de concentración de SO₂ durante el 2022 estación MUN



Nota. Elaboración propia.

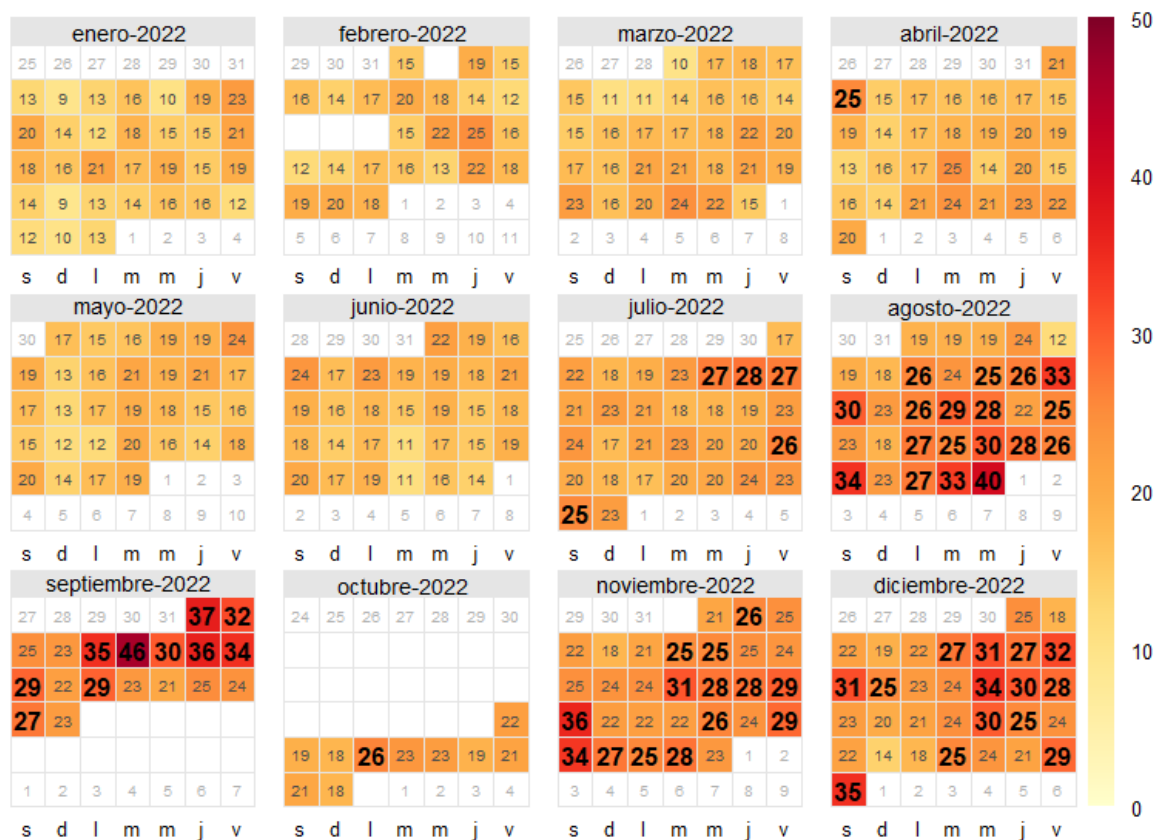
La Figura 46 muestra los días en los cuales se sobrepasó la norma estipulada de concentración promedio en 24 h para dióxido de azufre (SO₂). En donde se resaltan los días de color rojo intenso, como aquellos donde su media diaria sobrepasó el valor de la NECA igual a 125 (µg/m³) en 24 horas.

El calendario generado no resalta días con concentración alta durante el 2022, por el contrario, los valores promedio diarios en esta estación cumplen con la normativa nacional vigente. Además, se puede contabilizar 47 días en los cuales no se cumple los criterios de representatividad diaria o en su defecto estuvo inactivo el equipo.

El calendario de concentraciones promedio diarias para el contaminante NO₂, registró varios días en los cuales sobrepasa los límites permisibles. Este valor fue estipulado por la OMS (2021) en su guía de recomendaciones sobre calidad del aire. Por tal motivo, se remarca las concentraciones promedio diarias de aquellos días de alta contaminación, como se muestra en la Figura 47.

Figura 47:

Calendario de concentración de NO₂ durante el 2022 estación MUN

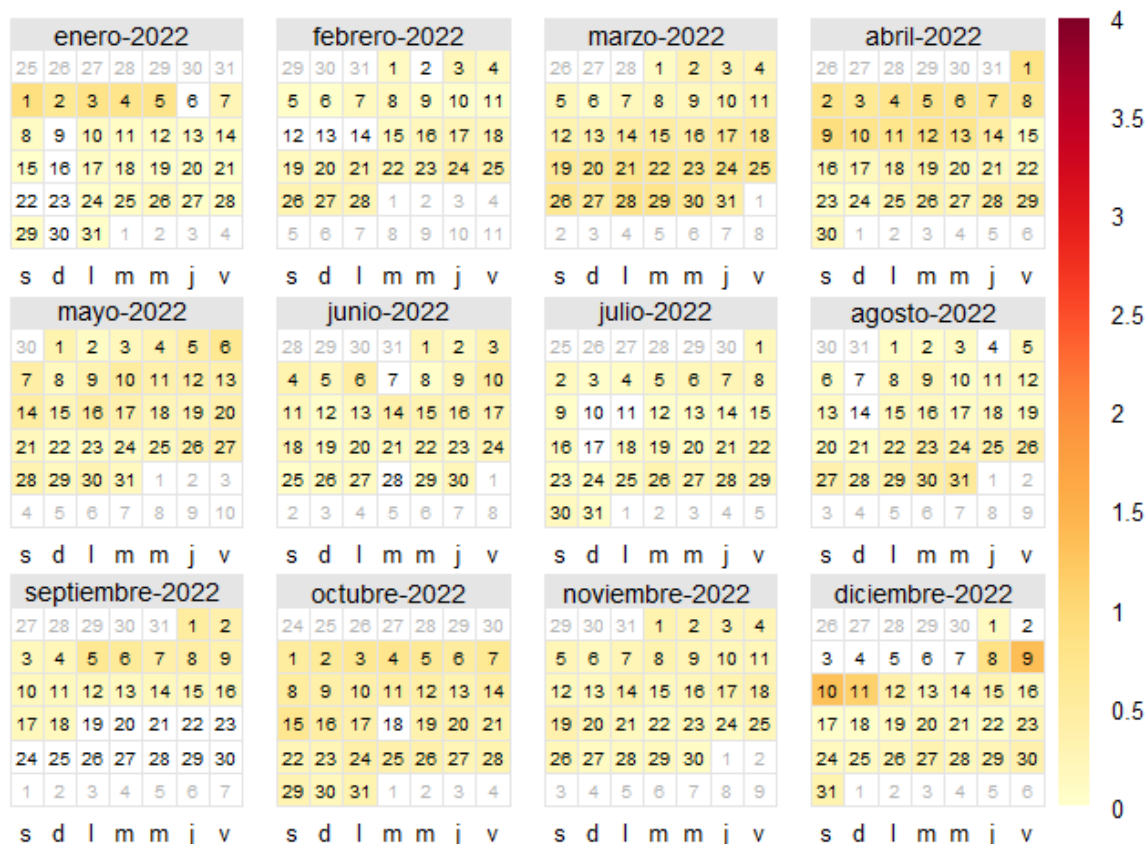


Nota. Elaboración propia.

El límite de concentración promedio en 24 horas para el NO₂ es de 25 µg/m³, tal como lo expuesto en la Tabla 5 acorde a las guías de la OMS (2021). Según el calendario generado para NO₂ en la estación MUN, se registraron 63 días en los cuales se sobrepasa el límite establecido. Por el contrario, hubo 38 días en los cuales no se cubre el criterio de representatividad mayor al 75 % o en su defecto tales días estuvo inactivo el analizador.

Figura 48:

Calendario de concentración de CO durante el 2022 estación MUN



Nota. Elaboración propia.

El calendario generado para CO mg/m³, evidentemente no supera los límites establecidos en la guía de la OMS (2021) en todos los días del año 2022. En tal caso, se puede evidenciar que los días que mayores niveles de concentración tuvieron fueron los días 9 y 10 de diciembre; sin embargo, estos llegan a la mitad del valor límite. No obstante, considerando los días que estuvo inactivo el analizador o no cumplió el criterio de representatividad, suman 37 los días de falta de cobertura por la RM.

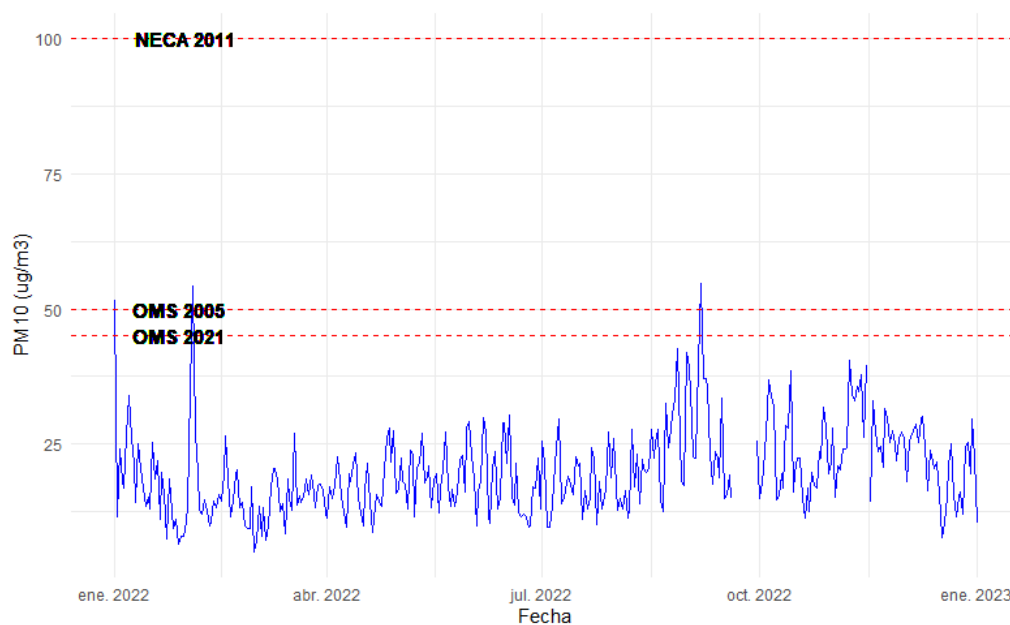
4.10.2. Límites en la NECA y OMS

Las gráficas a continuación realizan una comparación entre la normativa nacional vigente y las recomendaciones para la calidad del aire que realiza la OMS tanto en su versión del 2005 como en la actualización del 2021. Se puede reflejar la permisibilidad de la normativa para los límites de concentración promedio diaria representados en series temporales para MP₁₀, MP_{2.5} y SO₂. Por el contrario, no se puede comparar la NECA para CO y NO₂, porque no se cuentan con regulaciones en el corto plazo para estos contaminantes criterio.

Se recalca que las Figuras 49 a 52, corresponden a la estación MUN monitoreados por analizadores automáticos (II), mientras que las Figuras 53 a 56 coinciden para la estación TET monitoreados por microsensores (I). Los cuales tienen mayor cobertura durante el año 2022 y cumplen los criterios de representatividad acorde a la Tabla 10.

Figura 49:

Serie temporal promedio diaria MP_{10} MUN (II)

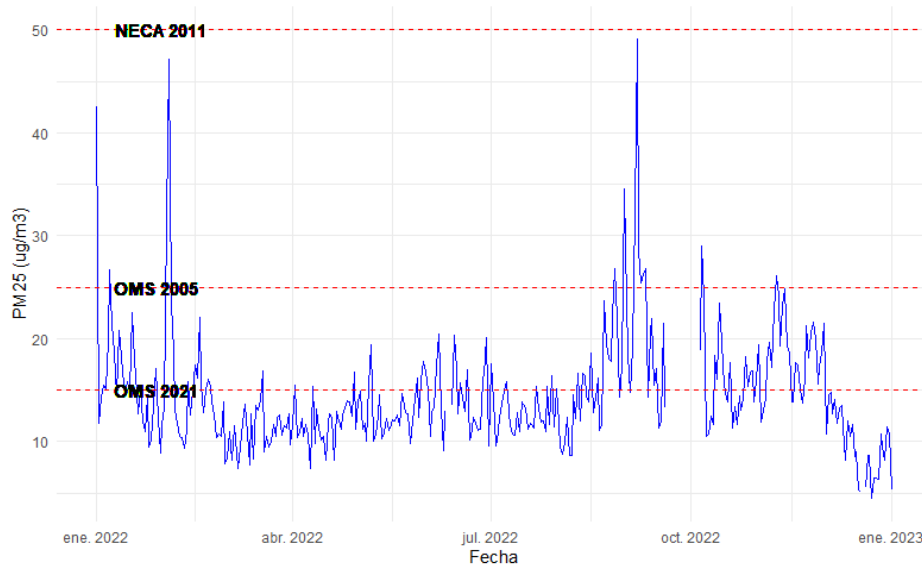


Nota. Elaboracion propia.

La Figura 49 indica claros picos en la concentración en días del mes de enero, febrero y septiembre, en los cuales se sobrepasan los límites que recomienda la OMS tanto del 2005 como de 2021, sin embargo, no se sobrepasa lo remarcado a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estipulados por la NECA.

Figura 50:

Serie temporal promedio diaria MP_{2.5} MUN (II)

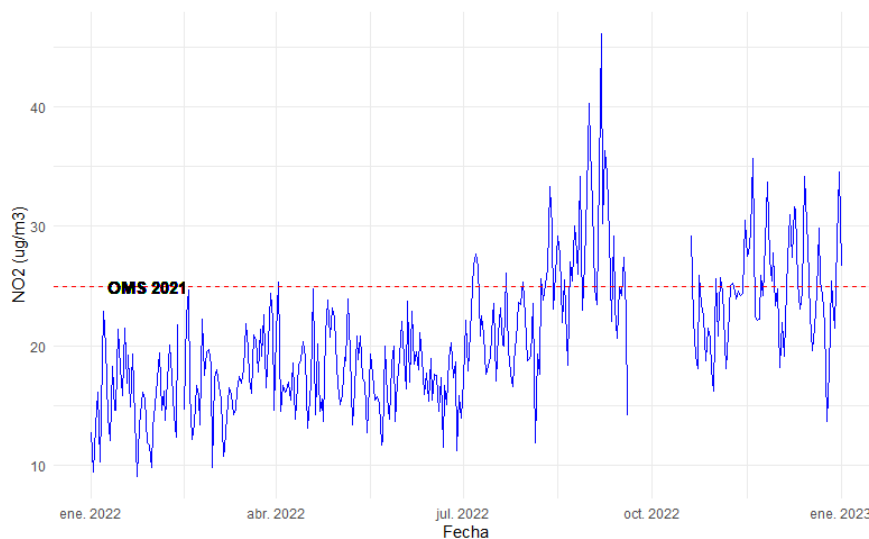


Nota. Elaboracion propia.

La Figura 50 refleja que en todos los meses en al menos un día se sobrepasaron los niveles recomendados por la OMS en sus dos versiones, en comparación con la figura anterior tiene los mismos picos en cuales se acerca a lo estipulado por la NECA.

Figura 51:

Serie temporal promedio diaria NO₂ MUN (II)

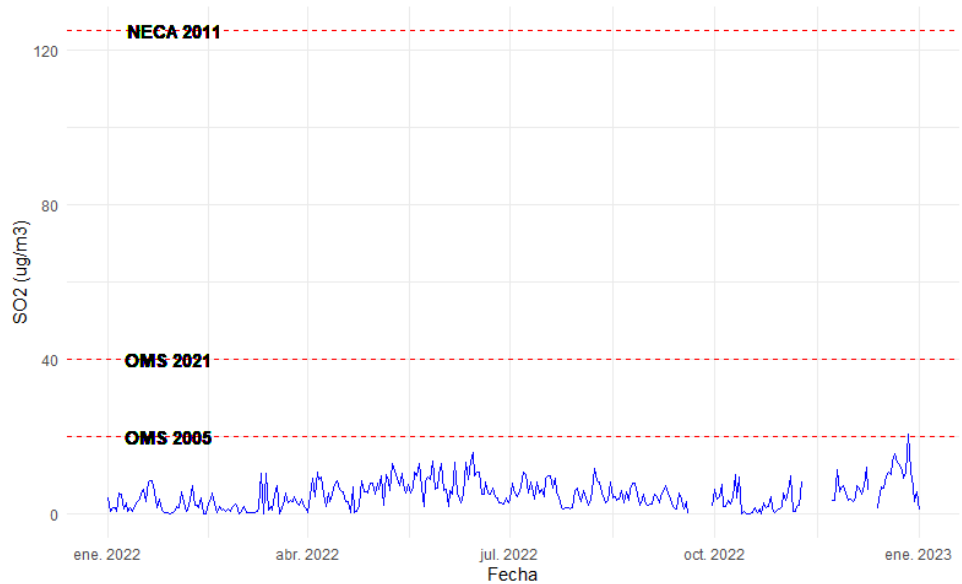


Nota. Elaboración propia.

La Figura 51 muestra que a partir del segundo semestre el 2022 se sobrepasa los límites en todos los meses por lo menos en un día, respecto a las recomendaciones que realiza la OMS 2021. Por el contrario, no se cuenta normativa para esta regulación en la NECA.

Figura 52:

Serie temporal promedio diaria SO₂ MUN (II)

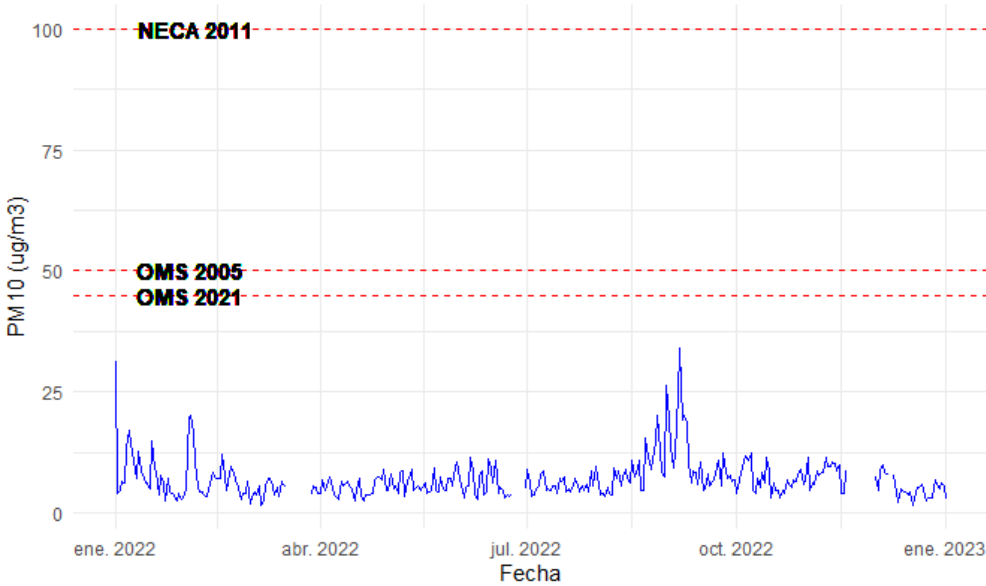


Nota. Elaboracion propia.

La serie temporal de la Figura 52 indica que para el SO₂ no se verifica excedencias sobre la norma en ningún día del año tanto para la NECA (2011) como OMS (2021). Sin embargo, se puede ver que lo remarcado por la OMS (2005) es inferior a lo estipulado por la ultima regulación y tan solo se sobrepasa esta regulación un día del mes de diciembre.

Figura 53:

Serie temporal promedio diaria MP_{10} TET (I)

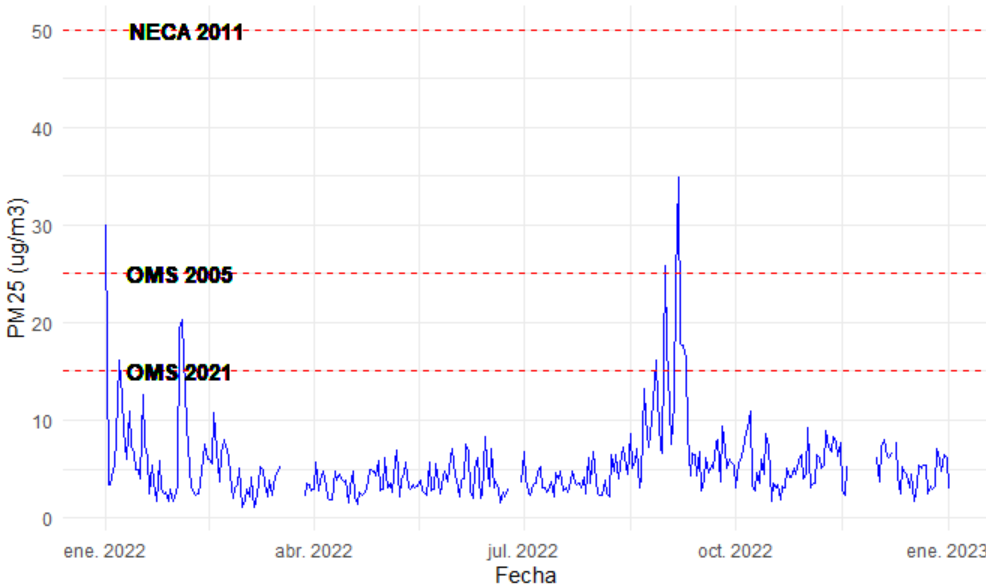


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 53 el MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede ver claramente que en la estación TET ubicada en el terminal terrestre de Cuenca, no supera la normativa nacional ni excede las recomendaciones de la OMS 2005 y 2021.

Figura 54:

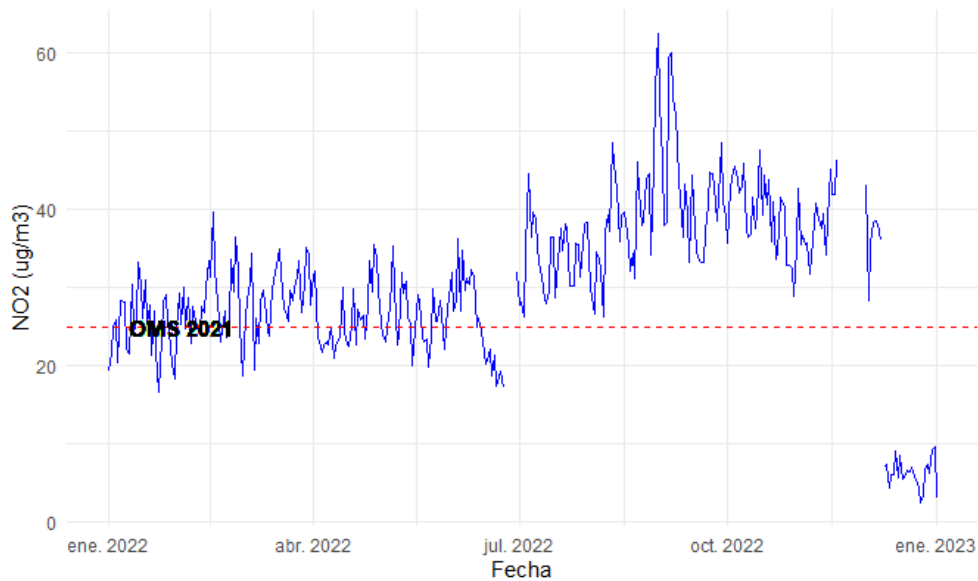
Serie temporal promedio diaria $MP_{2.5}$ TET (I)



Nota. Elaboración propia. Correspondiente a la Figura 54, está claramente indica tres picos de contaminación, en uno de los días del mes de enero, febrero y septiembre, en los cuales se supera las recomendaciones de la OMS (2005), por el contrario, no se verifica excedencias en la concentración promedio diaria de $MP_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sobre la NECA (2011).

Figura 55:

Serie temporal promedio diaria NO_2 TET (I)

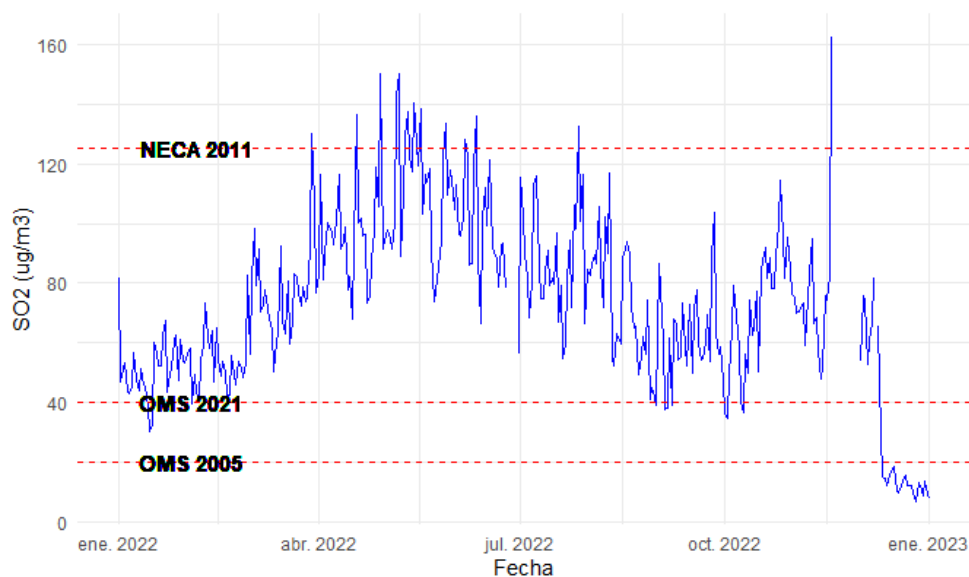


Nota. Elaboración propia.

La serie temporal de las concentraciones promedio diarias de NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la estación TET, reflejan que, durante todos los meses del año, se supera en al menos un día las recomendaciones de la OMS (2021). También se puede ver un pico en su concentración durante el mes de septiembre, y un claro aumento en las concentraciones a partir del segundo semestre el año.

Figura 56:

Serie temporal promedio diaria SO₂ TET (I)



Nota. Elaboración propia.

El caso particular de la Figura 56 indica que las concentraciones promedio diarias de SO₂ (µg/m³), en la estación TET, superan los estándares de calidad ambiental estipulados por la OMS. No obstante, se puede ver que en todos los días del año se supera lo recomendado en la OMS (2005) el cuál es 20 (µg/m³) en 24 horas y en casi todos los días lo recomendado en la OMS (2021) el cual es 40 (µg/m³). Indicando que no se cumplen los límites establecidos para proteger la salud recomendados por la OMS en la mayor parte del año pasado en tal estación. Al igual que, se supera los niveles regulatorios de la NECA (2011) el cual es 125 (µg/m³) en 24 horas, en los meses de mayo, junio y noviembre. Es notorio que existe un aumento en las concentraciones a finales del primer semestre y un decremento a inicios del segundo semestre.

Cabe recalcar que para este análisis no se graficó la serie temporal de CO (mg/m³), ya que no supera en ningún caso la normativa nacional, ni las recomendaciones internacionales en ninguna de las estaciones.

4.11. Discusión

4.11.1. Calidad del aire en la ciudad de Cuenca

En términos de calidad del aire en áreas urbanas, son varios los autores que coinciden en que la principal fuente primaria de material particulado inferior a 10 y 2.5 micras, es producto de las emisiones de combustibles de fuentes móviles tanto de escape y no escape (Squizzato

et al., 2017). Es así que, a nivel local el Inventario de Emisiones del cantón Cuenca con año base 2014 y el Informe de Calidad del Aire 2021, mencionan que, en la zona urbana el tráfico vehicular es la principal fuente móvil de emisión, junto con el aporte del parque industrial como fuente puntual al noroccidente de la ciudad (EMOV - EP, 2016; Red de Monitoreo de Calidad del Aire, 2021). Está problemática de contaminación local lo ratifica el estudio realizado por Moreira, (2018); el cuál luego de una revisión bibliográfica sobre la contaminación del aire por emisiones industriales a nivel nacional, señala que la contaminación del aire se da en las principales ciudades del país, siendo Cuenca una de ellas (Moreira-Romero, 2018).

El análisis direccional por frecuencia de vientos resultó tener prevalencia en las direcciones provenientes del E, S y SO para la ciudad de Cuenca durante el 2022, respecto a las estaciones de la EMOV - EP. Mientras que Jerves Cobo et al., (2016) determinó que la dirección dominante del viento es NE durante el periodo 1990 a 2014, y un promedio en la velocidad del viento de 1,95 m/s; usando la información meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar. Conforme a este análisis, determinar la prevalencia de estos vientos durante el año estudiado permitió comprender la relación compleja entre velocidad, dirección y concentración de un contaminante atmosférico mediante gráficos polares bivariados. En función de esto la frecuencia direccional favoreció las concentraciones altas de MP_{10} y NO_2 en la estación CCA, cuando el viento provenía del E en rangos de velocidad de 0 a 4 m/s. Por ende, se considera el aporte de emisiones del parque industrial como influyente en las concentraciones de estos contaminantes criterio siendo una fuente próxima a la estación. Tal como se puede ver en los mapas de las Figuras 26 y 29 que mediante sus gráficos polares se pudo mejorar la comprensión espacial de la dispersión que tuvieron a escala vecinal cada uno de estos contaminantes.

Por otra parte, respecto al comportamiento de los contaminantes atmosféricos varios son los autores que convergen en el criterio de que un aumento en la velocidad del viento; generalmente da como resultado concentraciones más bajas debido a una mayor dilución y turbulencia mecánica producto del transporte de contaminantes (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012). Para nuestro caso, al evaluar las concentraciones de contaminantes criterio en tres puntos de la ciudad mediante gráficos polares; estos dan como resultado comportamientos distintos en cada estación.

Esta diferenciación en su comportamiento es producto de la metodología que usa la función "polarPlot", la cual a través del estudio realizado por Carslaw et al., (2006), se explica que estos gráficos en primera instancia; discriminan fuentes a nivel del suelo o fuentes con cantidades significativas de contaminación. Por otra parte, recalcan el uso de esta función

para considerar una relación más compleja entre la concentración de un contaminante, la velocidad y dirección del viento; como es el “efecto calle cañón” en ciudades con estructuras circundantes que actúan como barreras en el flujo del viento.

Este efecto en calles urbanas se considera un problema de recirculación o resuspensión de partículas, en donde la relación entre las concentraciones y velocidad del viento en los cañones de las calles puede ser bastante complejas. Puesto que, no siempre las velocidades del viento más altas resultan en concentraciones más bajas producto de este fenómeno. Es por ello que concluyen en su estudio que estas complejidades se revelan extremadamente bien mediante gráficos polares bivariados (D. Carslaw et al., 2006). De acuerdo a esta afirmación, se llega a inferir que el “efecto calle cañón” influye en el comportamiento de varios contaminantes en la estación MUN, dado sus gráficos polares en el Centro Histórico de la ciudad; por lo cual se permite que los contaminantes queden atrapados y se recirculen dentro de este espacio ya que se restringe su dispersión.

La calidad del aire en términos de CO y óxidos de nitrógeno están fuertemente relacionados con el tráfico vehicular a escala urbana. El estudio realizado por Rivera Campoverde et al., (2021), en donde usa la información generada por la RM de la estación MUN, para determinar la correlación entre el tráfico vehicular y los gases contaminantes, encontró una correlación moderada a fuerte entre el tráfico vehicular y las concentraciones de CO con un coeficiente de correlación de “Pearson” igual a 0,60 y 0,42 entre el Tráfico vehicular y NO_x (Rivera Campoverde et al., 2022). Así también el estudio realizado por Jerves Cobo et al., (2016) determina que los ejes viales exteriores de mayor tráfico vehicular en la ciudad son la Av. Circunvalación y Av. de Las Américas. Dado este análisis correlacional y observacional de estos autores, el presente estudio mediante gráficos polares bivariados nos permite sugerir que la Av. Circunvalación al sur, Av. de las Américas en todo su trayecto, Av. España al norte y Av. Loja al sur, son ejes viales con alto tráfico vehicular; donde se observa que las emisiones por fuentes móviles de CO, NO₂ y material particulado alcanzan concentraciones más altas, que las registradas en otros sectores urbanos. Esto se puede ver con los gráficos generados (Figuras 23, 24 y 25), los cuales muestran una tendencia marcada en dirección a estas vías como fuente principal de contaminación.

Las gráficas respecto a la variación horaria, mensual y diaria de las concentraciones medias de los contaminantes criterio, permitieron distinguir patrones marcados en su comportamiento considerando los valores máximos de polución. El patrón mejor marcado en las concentraciones altas a una escala temporal diaria se presenta en horarios de alto tráfico vehicular tanto en la mañana como en la tarde. Por otra parte, estos gráficos permitieron ver

que uno de los contaminantes gaseosos que presento valores altos en un horario recurrente es el O_3 ; en un horario de 11H00 a 13H00 diariamente. El mismo estudio de Rivera Campoverde et al., (2021), encuentra una correlación positiva fuerte entre la radiación solar y el O_3 igual a 0,90 y una relación negativa fuerte con la humedad relativa igual a -0,83. De esta forma, en la ciudad de Cuenca los valores máximos de O_3 se registran en horarios de medio día; por otra parte, la Figura 32 nos permite ver que existe una relación inversa entre el O_3 y NO_2 en el mismo horario.

4.11.2. Relación entre metodologías de monitoreo (I) y (II)

La Normativa Europea dispuesta por la Directiva Ambiental 2008/50/EC, define un número mínimo de estaciones de monitoreo de calidad del aire según el nivel de contaminación, densidad en la población y el área de cobertura. La calidad del aire se monitorea midiendo las concentraciones de CO , NO_2 , O_3 , SO_2 , compuesto orgánicos volátiles (COV's) y MP (fino y grueso) en sitios estacionarios por instrumentación de referencia (II) precisos y costosos (Borrego et al., 2016). Por lo general una estación que cumpla tales criterios cubre en promedio unas 100 000 personas en las ciudades de países desarrollados (Penza, 2020).

En ese contexto la ciudad de Cuenca se acerca al medio millón de habitantes en el área urbana, por tal razón se sustenta la subred de microsensors de bajo costo como metodología indicativa que proporciona un control en la calidad del aire para la ciudad. Estos microsensors de marca Envea con patente Francesa, cumple la acreditación europea de control indicativo de calidad del aire (Envea, 2019). Por su parte Borrego et al., (2016) indica que, si bien los microsensors no pueden ser considerados con fines regulatorios en la Unión Europea, estos pueden recolectar a una mayor densidad espacial que los equipos tradicionales, con ello la información de los analizadores automáticos (II) y los microsensors (I) son una herramienta potencial para nuevas estrategias frente al control de la calidad del aire en la ciudad.

Ahora bien, el análisis de regresión y correlación entre ambas metodologías nos permite inferior que el material particulado ($MP_{2.5}$) muestra una mala correlación entre los analizadores automáticos y los microsensors; el mismo caso se dio para el SO_2 durante el primer año de monitoreo. Esto podría deberse a la poca cobertura que tuvieron durante el año 2022, siendo el 65 % y 71 % respectivamente. Por su parte, el estudio de Badura et al., (2019) afirma que los microsensors pueden llegar a subestimar o sobreestimar las mediciones frente a equipos de referencia (II), debido a que por la calibración de fábrica se utilizan partículas y gases con propiedades completamente diferentes a las del área de

estudio, por ende recomienda que los microsensores necesitan ser calibrados en el entorno final de las mediciones (Badura et al., 2019).

Por el contrario, para los parámetros MP_{10} , CO, NO_2 hubo una significativa correlación de “Spearman” en presencia de datos atípicos; sin embargo, presentan una distribución muy dispersa y no marcada linealmente. Caso contrario sucede para el O_3 , el cuál presentó tener un coeficiente de correlación de “Spearman” positivo fuerte igual a 0,90 y una tendencia lineal entre ambas metodologías dada su gráfica de dispersión.

El mismo estudio de Borrego et al., (2016) el cuál evaluó los datos de microsensores frente a métodos de referencia; determinó un bajo rendimiento general en la dispersión de valores de MP_{10} y $MP_{2.5}$ luego de realizar una intercomparación entre ambas metodologías, usando 15 plataformas de microsensores de varias marcas, frente al laboratorio móvil de calidad del aire (LabQAr) con equipos referenciados en calles de la ciudad de Aveiro (Portugal). Mientras que el O_3 , CO y NO_2 , fueron gases que se perfilaron de manera satisfactoria al monitoreo ambiental por ambas metodologías demostrando una linealidad entre ellas.

Es así que conforme a lo explicado no se pudo generar un modelo de regresión lineal simple para el parámetro de $MP_{2.5}$ entre (I) y (II), inclusive luego de haber tratado de mejorar la relación lineal con una transformación Box – Cox, tal como lo sugiere Kottedoga et al., (2008), cuando existe un abanico en la dispersión de datos o heterocedasticidad en los mismos. Sin embargo, considerando que un modelo de regresión lineal simple no demanda tiempo y tampoco requiere un gran potencial computacional, se generó un ajuste lineal para la variable respuesta “Ozono II” en función de la variable predictora “Ozono I”, dando un R^2 igual 0,84 y un MSE igual a 58,30. En cambio al realizar una evaluación del modelo generado por validación cruzada triple, este sugiere que el modelo no generaliza bien cuando existe valores que el modelo no ha visto, lo que se conoce como un sobreajuste en el modelo. Según Zanotti et al., (2019) esto pasa cuando un modelo ha sido entrenado demasiado bien por los datos de entramiento y la línea de tendencia con los valores predichos atraviesa varios puntos observados del modelo, por lo cual no encuentra una regla predictiva general, además sugiere modelos basados en redes neuronales para datos que no presentan una linealidad marcada (Zanotti et al., 2019).

4.11.3. Superaciones en la normativa nacional y guías de la OMS

El Gobierno del Ecuador por medio del boletín N.º 128 del 14 de agosto de 2020, reconoce lo estipulado por la OMS; al referirse que la contaminación del aire en ciudades, aumenta el riesgo en la población vulnerable de padecer enfermedades respiratorias agudas como la

neumonía o el cáncer de pulmón. Es así que, por medio de este comunicado se enfatiza que es prioridad nacional proteger la salud de las personas, la calidad del aire y el equilibrio ecológico. Mencionando a la Norma de Calidad del Aire o Niveles de Inmisión como directriz que establece las concentraciones máximas permitidas para contaminantes criterio. Es por ello, que la Red de Monitoreo de la EMOV – EP sirve como institución encargada de la prevención, control, alarma y monitoreo de la contaminación del aire en la ciudad de Cuenca.

Enmarcados con lo antes mencionado, el análisis de la información generada por la RM sirvió para analizar las excedencias de los valores medidos por analizadores automáticos (II) avalados por la EPA y NECA (2011) en las estaciones EIE, MUN y CCA. Pero antes de abordar las excedencias encontradas, es importante destacar que la NECA (2011) presenta un enfoque más flexible o indulgente en comparación con las directrices recomendadas por la OMS (2005) y que la actualización de la OMS (2021).

El CO y NO₂ en 1 hora no superaron la normativa nacional ni internacional en ninguna estación; sin embargo, el NO₂ si excede las recomendaciones de la OMS (2021) para el promedio aritmético en 24 horas (25 µg/m³). Los resultados indican que a partir del mes de julio se excede en al menos un día el límite, siendo los meses de agosto y septiembre los de mayor contaminación por este contaminante en la estación MUN. No obstante, la Figura 36 sobre la variación horaria, mensual y diaria de las concentraciones de SO₂ en la ciudad, nos permitió distinguir que la estación TET tiene niveles de concentración significativamente mayores que la estación CCA y EIE. De esta manera la Figura 56 revela que se sobrepasó todos los días del año el valor máximo permitido en 24 horas de la OMS (2021), y en al menos 1 día los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y noviembre el límite de la NECA (2011). Así también se sobrepasó en al menos un día del mes el límite recomendado de la OMS (2021) para NO₂ en 24 horas en la misma estación.

Si bien es cierto que la Figura 36 y 56 denotan excedencias en la norma nacional e internacional, estas fueron generadas con los valores monitoreados por microsensores, por tal no se podría considerar dicha información con fines regulatorios. Sin embargo, al ser una metodología indicativa de contaminación esta información nos puede servir como línea base para futuras investigaciones sobre el impacto del Terminal Terrestre en la contaminación del aire a escala vecinal en términos de material particulado, NO_x y SO_x. Puesto que, según el balance energético nacional 2021 el sector con mayor consumo de diésel en el Ecuador fue el transporte público (83 %), de ahí que el 74 % tuvo demanda por vehículos de carga pesada seguido de buses y furgonetas con un 6 %. En el mismo sentido, el estudio realizado por Patiño Aroca et al., (2022) sobre el inventario de emisiones vehiculares en carretera en la

ciudad de Guayaquil, sugiere una reducción de la cantidad de azufre presente en el combustible diésel. Puesto que, en dicho estudio, los autobuses urbanos fueron responsables del 82 % del total de emisiones en términos de NO_x y MP₁₀. Así también, se debe considerar que actualmente en cuanto al contenido de azufre en el combustible, los requisitos para motores modernos están en el orden de 15 ppm; mientras que, en tal estudio el contenido máximo de azufre en el diésel premium vendido en Guayaquil es de 500 ppm (Patiño-Aroca et al., 2022).

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

La calidad del aire en Cuenca se puede ver diferenciada por sectores, de esta manera tanto los gráficos polares como el análisis descriptivo de los datos generados por la RM, indican que el vecindario monitoreado por la estación EIE tiene valores de CO más elevados que el resto de estaciones. Así también la estación MUN presentan valores más altos respecto a MP_{2.5} en comparación con las estaciones EIE y CCA. En el mismo sentido, es sustancial considerar que la estación TET monitoreada por microsensores presentan valores significativamente superiores respecto a NO₂ y SO₂.

Es importante resaltar la utilidad de los microsensores usados para el monitoreo de los gases de CO, O₃, y NO₂, los cuales presentaron un coeficiente de correlación de “Spearman” positivo y fuerte, frente a metodologías avaladas por la EPA. Además de coincidir con el reporte en simultáneo de valores máximos, reportados por los analizadores automáticos. También se destaca el aumento en la cobertura espacial por la RM de la EMOV – EP, respecto al monitoreo de la calidad del aire a escala vecinal con la implementación de la subred de microsensores en la ciudad.

El análisis direccional de los vientos permitió comprender la dinámica de los mismos en tres estaciones de la RM de la EMOV – EP, los cuales representaron el centro, norte, y sur de la ciudad. De esta manera el mismo análisis permitió establecer que los vientos prevalentes durante el año 2022 favorecieron las concentraciones altas de varios contaminantes en la ciudad. Siendo el caso del MP₁₀ y NO₂, los cuales al ser monitoreados por microsensores en la estación CCA, indican concentraciones altas cuando los vientos provienen del E en mayor frecuencia. Por ende, tal vecindario se vio influenciado por las emisiones del parque industrial ubicado en esa dirección.

La calibración de los microsensores a los analizadores automáticos es crucial para mejorar la calidad de los datos obtenidos. Por tal, se concluye que el presente modelo de calibración para los datos de Ozono (I) se ajusta bien a los valores del O₃ (II), con los datos del primer año de monitoreo; sin embargo, hay que tener cuidado con valores que el modelo no ha analizado, puesto que presenta un MSE alto a comparación con el MSE generado con todos los datos de entrenamiento. Por otra parte, no se pudo generar un modelo de regresión lineal simple para los datos de MP_{2.5} obtenidos por el microsensor, frente al analizador automático ubicados en la estación MUN, debido a que no presentaron un buen coeficiente de correlación y no cumplieron los requisitos de normalidad y linealidad después de aplicar algunas transformaciones no lineales como: raíz cuadrada, logarítmica y Box – Cox.

Las excedencias sobre la norma nacional e internacional vistas en este trabajo, sirven para prevenir los efectos indeseables de la contaminación atmosférica, manteniendo los niveles de los contaminantes criterio dentro de los valores aceptables. De esta manera, se concluye que es imperioso el actuar de las autoridades locales a tener cuidado sobre los niveles de MP₁₀ y MP_{2.5}; ya que supera las guías recomendadas por la OMS (2021), tanto en el corto como en el largo plazo de exposición en la ciudad de Cuenca.

Con ello, se resalta la importancia del monitoreo continuo realizado por la RM de la EMOV – EP, el cual permite de manera efectiva alertar a la ciudadanía para reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire, con la finalidad de garantizar un entorno más saludable a la población cuencana. Cabe mencionar que, el enfoque principal debe estar en el control y reducción de MP_{2.5} dado su cercanía a los valores límite de la normativa nacional y sus consecuencias en la salud pública.

Los horarios más influyentes sobre la calidad del aire en días laborales fueron de 6H00 a 9H00, según las gráficas generadas sobre las variaciones horarias de las concentraciones medias de los contaminantes criterio, lo cual coincide con horarios de alto tráfico vehicular en la ciudad. Con ello se resalta el impacto de las emisiones por fuentes móviles presentes en dicho horario.

Finalmente, si bien existe un sinnúmero de herramientas informáticas para analizar datos de contaminación atmosférica, de las cuales la mayoría son de acceso pagado bajo suscripción. El uso de RStudio tiene la ventaja de ser una herramienta de libre acceso o código abierto y el paquete “Openair” está dedicado y desarrollado según sus autores para analizar datos de calidad del aire, dando resultados significativos para la gestión de la calidad del aire en una ciudad.

5.2. Recomendaciones

Respecto al modelo de calibración para los valores generados por los microsensores considerando el O_3 , CO y NO_2 , se recomienda explorar modelos lineales múltiples donde se considere variables meteorológicas o valores de otros contaminantes criterio, así como modelos basados en redes neuronales para las relaciones que no presentan linealidad en sus metodologías.

Si bien este estudio se ha centrado en utilizar la información generada por la RM de la EMOV – EP, para determinar algunos patrones y tendencias en la contaminación a escala urbana; se recomienda efectuar un análisis más riguroso con otras metodologías que permitan identificar las fuentes que generan altas concentraciones de contaminantes criterio en la ciudad de Cuenca.

Implementar la herramienta informática RStudio con el paquete “Openair” para la generación de informes de calidad del aire u otras tareas, que mejoren el sistema de gestión de la calidad del aire en la ciudad y sirvan de línea base para la toma de decisiones enfocadas a mejorar la salud pública.

Referencias

- Amat, J. (2016). *Validación de modelos de regresión: Cross-validation, OneLeaveOut, Bootstrap*. <https://github.com/JoaquinAmatRodrigo/Estadistica-con-R>
- Aparicio, M. T. G. (s. f.). *CARACTERIZACIÓN DE LA POPULARIDAD EN SERVICIOS DE VÍDEO BAJO DEMANDA APLICADA A PERIÓDICOS DIGITALES*.
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., & Modzel, P. (2019). Regression methods in the calibration of low-cost sensors for ambient particulate matter measurements. *SN Applied Sciences*, 1(6), 622. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0630-1>
- Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, Th., Katsifarakis, N., Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. A., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., Minguillón, M. C., ... Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147, 246-263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- Camilloni, I. (2005). *Introducción. La Tierra: Un lugar para la vida | Composición y estructura vertical de la atmósfera |*. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Carslaw, D. (2019). *The openair manual open-source tools for analyzing air pollution data*. 2.6-6.
- Carslaw, D., Beevers, S., Ropkins, K., & Bell, M. (2006). Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, 40(28), 5424-5434. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.062>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). openair—An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27-28, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Carslaw, D., & Davinson, J. (2023, junio 16). *A Guide to the Analysis of Air Pollution Data*. The openair book. https://bookdown.org/david_carslaw/openair/
- COSUDE, & Ministerio del Ambiente. (2010). *Plan Nacional de Calidad del Aire*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>

- EMOV - EP. (2016). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca 2014* (N.º 1; p. 89). Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. https://www.researchgate.net/publication/311789933_Inventario_de_Emisiones_Atmosfericas_del_Canton_Cuenca_2014
- Envea. (2019). *Miniature solution for real—Time continuous pollution monitoring*. envea.global/cairnet/faq-downloads
- PART 50—NATIONAL PRIMARY AND SECONDARY AMBIENT AIR QUALITY STANDARDS, 40 CFR 50 (2006). <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-50>
- Part 53 Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods, 40 CFR 53 164 (2006). <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-53>
- PART 58—AMBIENT AIR QUALITY SURVEILLANCE, 40 CFR 58 (2006). <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-58>
- Environmental Protection Agency. (2022, Agosto 9). *Criteria Air Pollutants*. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- Environmental Protection Agency. (2023, mayo 10). *Términos E. EPA*. <https://espanol.epa.gov/espanol/terminos-e>
- Espinoza, C., & Palacios, E. (2014). *Contaminación del aire exterior. Cuenca - ecuador, 2009-2013. Posibles efectos en la salud*. 32, 4.
- Gorgas García, J., Cardiel López, N., & Zambrano Calvo, J. (2011). *ESTADÍSTICA BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE CIENCIAS* (Primera).
- Hayes, E. (2009, octubre 19). *An Independent Review of Monitoring Measures Undertaken in Neath Port Talbot in Respect of Particulate Matter (PM10)*. 176.
- Instituto Nacional de Tecnología y Cambio Climático. (2023). *Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
- Jerves Cobo, R., & Armijos Arcos, F. (2016). Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca—Ecuador. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.03>
- Kent, A., & David, C. (2009, enero 21). *Analysis of air pollution in North Lincolnshire*. 43.

- Kottegoda, N. T., Rosso, R., & Kottegoda, N. T. (2008). *Applied statistics for civil and environmental engineers* (2nd ed). Blackwell Pub.
- Kutner, M. H. (Ed.). (2005). *Applied linear statistical models* (5th ed). McGraw-Hill Irwin.
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399-402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>
- Met One Instruments. (2023). *Met One Instruments*. Continuous Particulate Monitor BAM 1020. <https://metone.com/products/bam-1020/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2021). *Balance Energético Nacional 2021*. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/5900-2/>
- Moreira-Romero, Á. F. (2018). Contaminación del aire en el medio ambiente por las emisiones de gases tóxicos de empresas industriales en Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 3(7), 299. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i7.553>
- Acuerdo Ministerial No. 097—A*, (2011) (testimony of NECA). https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Acuerdo-Ministerial-097-A-ANEXOS.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Patiño-Aroca, M., Parra, A., & Borge, R. (2022). On-road vehicle emission inventory and its spatial and temporal distribution in the city of Guayaquil, Ecuador. *Science of The Total Environment*, 848, 157664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157664>
- Penza, M. (2020). Low-cost sensors for outdoor air quality monitoring. En *Advanced Nanomaterials for Inexpensive Gas Microsensors* (pp. 235-288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814827-3.00012-8>
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire. (2020). *Informe de la calidad del aire de Cuenca, año 2020* (p. 121) [Técnico]. Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. https://www.emov.gob.ec/wp-content/uploads/2022/02/CALIDAD_DEL_AIRE_2020_compressed.pdf

- Red de Monitoreo de Calidad del Aire. (2021). *Informe de la calidad del aire de la Ciudad de Cuenca durante el año 2021*. Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. <https://www.emov.gob.ec/>
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R. G., & Dutter, R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R* (1.^a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470987605>
- Rivera Campoverde, N. D., Molina Campoverde, P. A., Novillo Quirola, G. P., Ortiz Valverde, W. F., & Serrano Ortiz, B. M. (2022). Influence of mobility restrictions on air quality in the historic center of Cuenca city and its inference on the Covid-19 rate infections. *Materials Today: Proceedings*, 49, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.474>
- Rodríguez, M. A., & León, C. M. (2012). *Fundamentos de climatología*. 64.
- Sohil, F., Sohali, M. U., & Shabbir, J. (2022). An introduction to statistical learning with applications in R: By Gareth James, Daniela Witten, Trevor Hastie, and Robert Tibshirani, New York, Springer Science and Business Media, 2013, \$41.98, e ISBN: 978-1-4614-7137-7. *Statistical Theory and Related Fields*, 6(1), 87-87. <https://doi.org/10.1080/24754269.2021.1980261>
- Squizzato, S., Cazzaro, M., Innocente, E., Visin, F., Hopke, P. K., & Rampazzo, G. (2017). Urban air quality in a mid-size city — PM2.5 composition, sources and identification of impact areas: From local to long range contributions. *Atmospheric Research*, 186, 51-62. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.011>
- Teledyne API. (2022). *Teledyne Quality Standards* [Teledyne Quality Standards]. A global leader in air quality, process gas instrumentation. <https://www.teledyne-api.com/about-us>
- TULSMA. (2018). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE*. https://www.gob.ec/sites/default/files/regulations/2018-09/Documento_Texto-Unificaco-Legislacion-Secundaria-Medio-Ambiente.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2022a). *Basic Information about Carbon Monoxide (CO) Outdoor Air Pollution*. Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air. <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>

United States Environmental Protection Agency. (2022b). *Ground-level Ozone Pollution*. Ground-level Ozone Basics. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#wwh>

United States Environmental Protection Agency. (2022c). *Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution*. Basic Information about NO₂. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

United States Environmental Protection Agency. (2022d). *Particulate Matter (PM) Pollution*. Particulate Matter (PM) Basics. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

United States Environmental Protection Agency. (2022e). *Sulfur Dioxide Basics*. Sulfur Dioxide (SO₂) Pollution. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>

Zanotti, C., Rotiroti, M., Sterlacchini, S., Cappellini, G., Fumagalli, L., Stefania, G. A., Nannucci, M. S., Leoni, B., & Bonomi, T. (2019). Choosing between linear and nonlinear models and avoiding overfitting for short- and long-term groundwater level forecasting in a linear system. *Journal of Hydrology*, 578, 124015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124015>

Anexos

Anexos 1: Resumen estadístico datos 2022 subred de microsensores (I)

La Tabla 21 muestra el resumen estadístico preliminar del set de datos de la subred de microsensores, recopilados durante el primer año de funcionamiento 2022, abarca las seis estaciones.

Tabla 21:

Resumen estadístico datos 2022 subred de microsensores (I)

ESCALA VECINAL										
Criterio	\bar{x}	Med	S	Max	Q1	Q3	g1	g2	Na's	
	CO	1,15	1,09	0,59	4,22	0,65	1,55	0,62	0,18	4075
	O ₃	2,63	0,00	5,42	43,65	0,00	2,39	2,67	7,69	48
C	NO ₂	37,12	35,45	14,00	121,22	26,58	45,22	0,91	1,43	3404
O	SO ₂	51,03	38,12	38,70	257,47	23,13	67,25	1,56	2,63	3319
N	MP ₁₀	7,48	6,05	6,11	148,82	3,87	9,29	5,48	78,11	3315
	MP _{2.5}	5,57	4,16	5,72	150,22	2,38	6,97	6,97	111,74	3315
	MP ₁	4,58	3,33	5,08	133,38	1,76	5,78	6,95	110,27	3315
	CO	0,64	0,59	0,27	2,59	0,46	0,75	1,49	3,41	2517
	O ₃	8,66	0,03	14,70	94,31	0,00	12,63	2,03	3,96	24
M	NO ₂	34,71	33,10	11,30	109,00	27,37	40,32	1,07	2,60	2443
U	SO ₂	36,24	29,98	26,70	244,14	19,02	45,00	2,10	6,69	2517
N	MP ₁₀	6,02	4,27	6,05	66,17	2,45	7,43	3,60	20,58	3102
	MP _{2.5}	4,66	3,12	5,25	56,95	1,72	5,61	4,04	24,68	3102
	MP ₁	4,00	2,62	4,71	52,24	1,35	4,87	4,13	25,99	3102
	CO	0,61	0,55	0,24	2,92	0,45	0,70	1,99	6,73	1143
	O ₃	4,34	0,03	7,89	49,01	0,00	5,24	2,24	4,84	0
C	NO ₂	28,95	27,43	9,89	86,66	21,85	34,21	1,11	2,13	1132
C	SO ₂	9,91	6,02	12,30	148,95	2,88	11,96	3,61	21,35	1795
A	MP ₁₀	10,10	7,91	8,08	125,95	5,09	12,41	2,88	15,96	1757
	MP _{2.5}	7,37	5,50	6,89	122,25	3,21	9,12	3,59	25,93	1758
	MP ₁	5,76	4,28	5,69	95,57	2,30	7,18	3,69	25,98	1758
	CO	0,76	0,65	0,77	21,49	0,49	0,86	13,12	254,55	1393
	O ₃	7,06	0,95	10,80	63,30	0,00	10,24	1,72	2,23	444
E	NO ₂	25,85	24,60	11,20	123,17	17,55	31,84	1,30	4,09	1370
I	SO ₂	27,66	23,09	22,30	272,01	13,35	34,78	2,61	13,16	1642
E	MP ₁₀	5,26	4,05	4,52	75,86	2,38	6,74	3,24	21,24	1368
	MP _{2.5}	4,38	3,19	4,22	75,27	1,68	5,66	3,44	24,33	1368
	MP ₁	3,76	2,83	3,46	60,50	1,54	4,85	3,35	22,94	1368
	CO	0,66	0,61	0,27	3,34	0,48	0,77	1,73	6,10	594
T	O ₃	19,89	15,37	16,50	90,15	6,57	30,84	0,81	-0,14	0
E	NO ₂	30,38	28,65	14,90	132,35	20,07	39,17	0,71	1,09	602
T	SO ₂	73,56	71,70	39,60	272,48	47,22	95,76	0,78	1,54	604

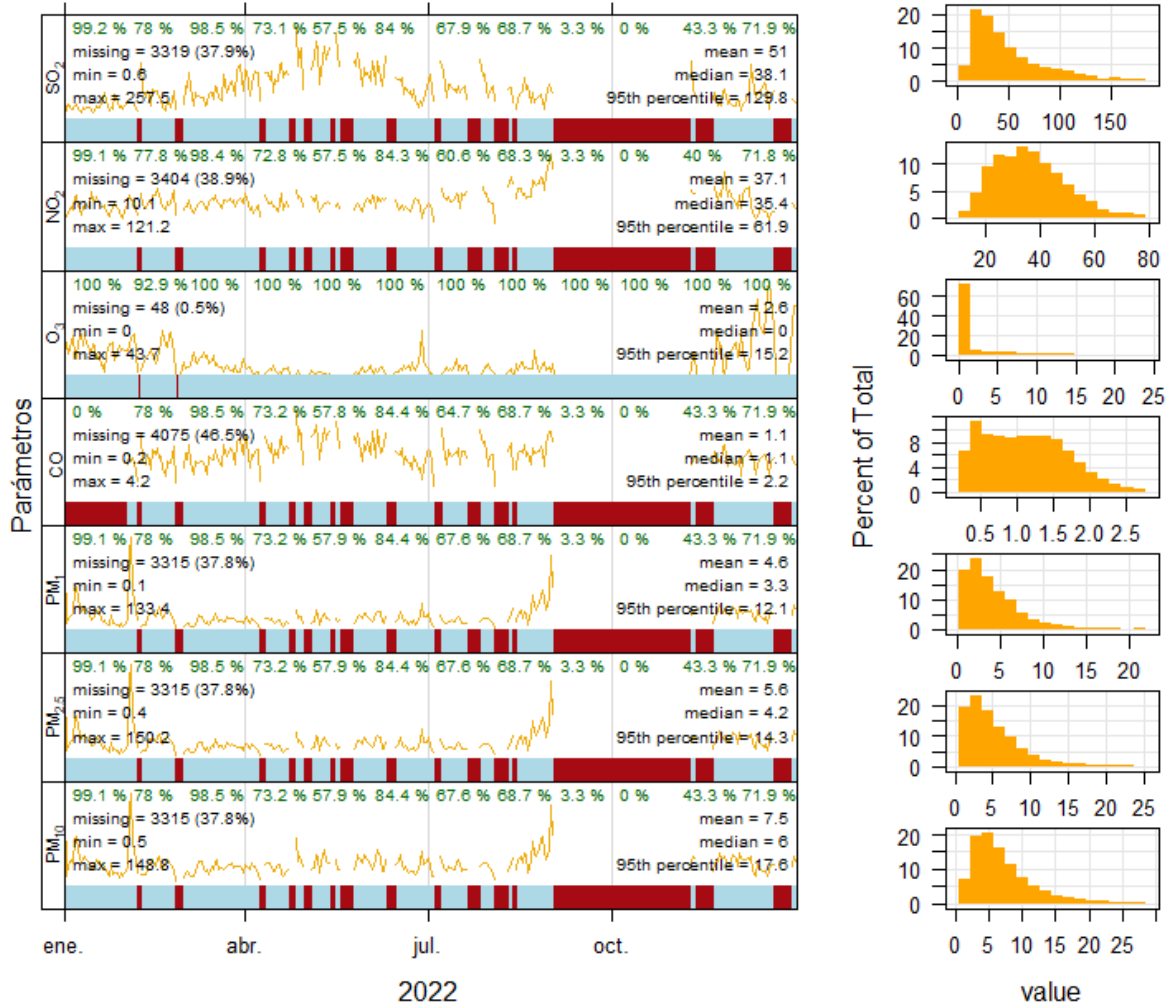
	MP ₁₀	7,01	5,34	6,09	117,41	3,15	8,78	3,73	32,92	850
	MP _{2.5}	5,35	3,89	5,52	116,86	2,07	6,65	4,72	49,87	850
	MP ₁	4,50	3,16	4,96	103,45	1,62	5,64	4,73	48,23	850
	CO	0,50	0,44	0,23	2,35	0,35	0,57	2,33	8,21	769
	O ₃	19,23	13,05	19,60	110,32	3,47	30,13	1,24	1,11	0
C	NO ₂	18,53	16,76	8,22	86,12	13,01	22,02	1,68	4,83	765
E	SO ₂	29,69	25,92	20,80	215,07	15,67	38,71	1,95	7,31	770
B	MP ₁₀	7,93	6,25	6,07	89,98	3,79	10,21	2,49	15,51	5826
	MP _{2.5}	6,47	4,98	7,60	204,33	2,80	8,26	13,48	294,32	5828
	MP ₁	5,55	4,25	6,55	173,31	2,27	7,20	12,61	277,59	5828

Nota. Elaboración propia. Las medidas de tendencia central expuestas en la Tabla 21 son la media (\bar{x}), mediana (Med), el cuartil 1 (Q1) y 3 (Q3), mientras que la medida de dispersión calculada fue la desviación estándar (S). Las medidas de apuntamiento y deformación como el coeficiente de asimetría de Fisher (g1) y el coeficiente de curtosis (g2). Además, de los dantos faltantes por estación y contaminante para cada set de datos (Na´s).

Anexos 2: Resumen gráfico de los datos disponibles

Figura 57:

Resumen gráfico estación CON monitoreado por (I) durante el 2022

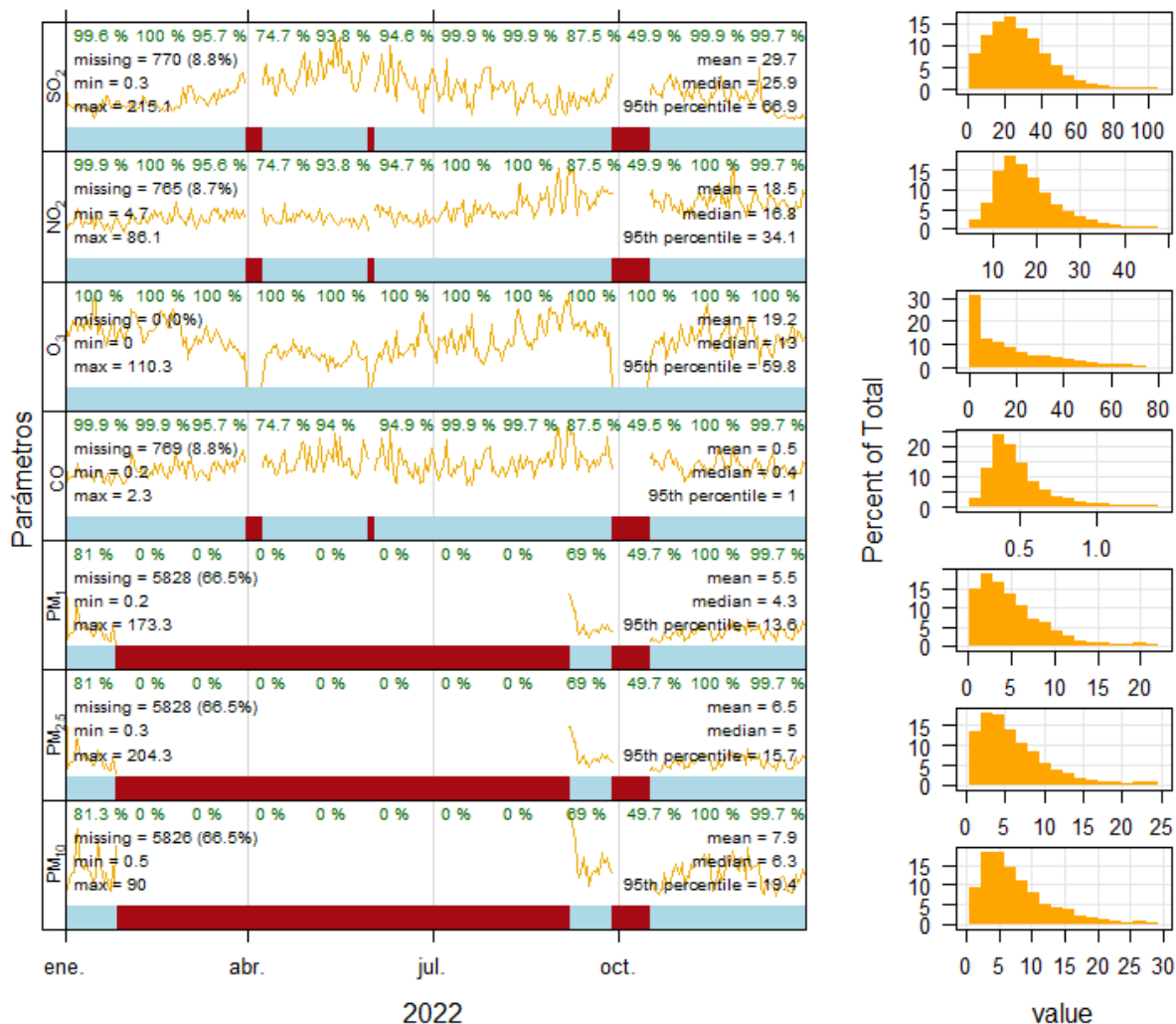


Nota. Elaboración propia.

La Figura 57 resume gráficamente las concentraciones de contaminantes criterio de la estación CON, la presente estación no cumple los criterios de representatividad durante el año 2022, a excepción del microsensador de O₃ que todos los meses tienen un 100 % de cobertura de datos, excepto el mes de febrero que tuvo 92,9 % de cobertura.

Figura 58:

Resumen gráfico estación CEB monitoreado por (I) durante el 2022

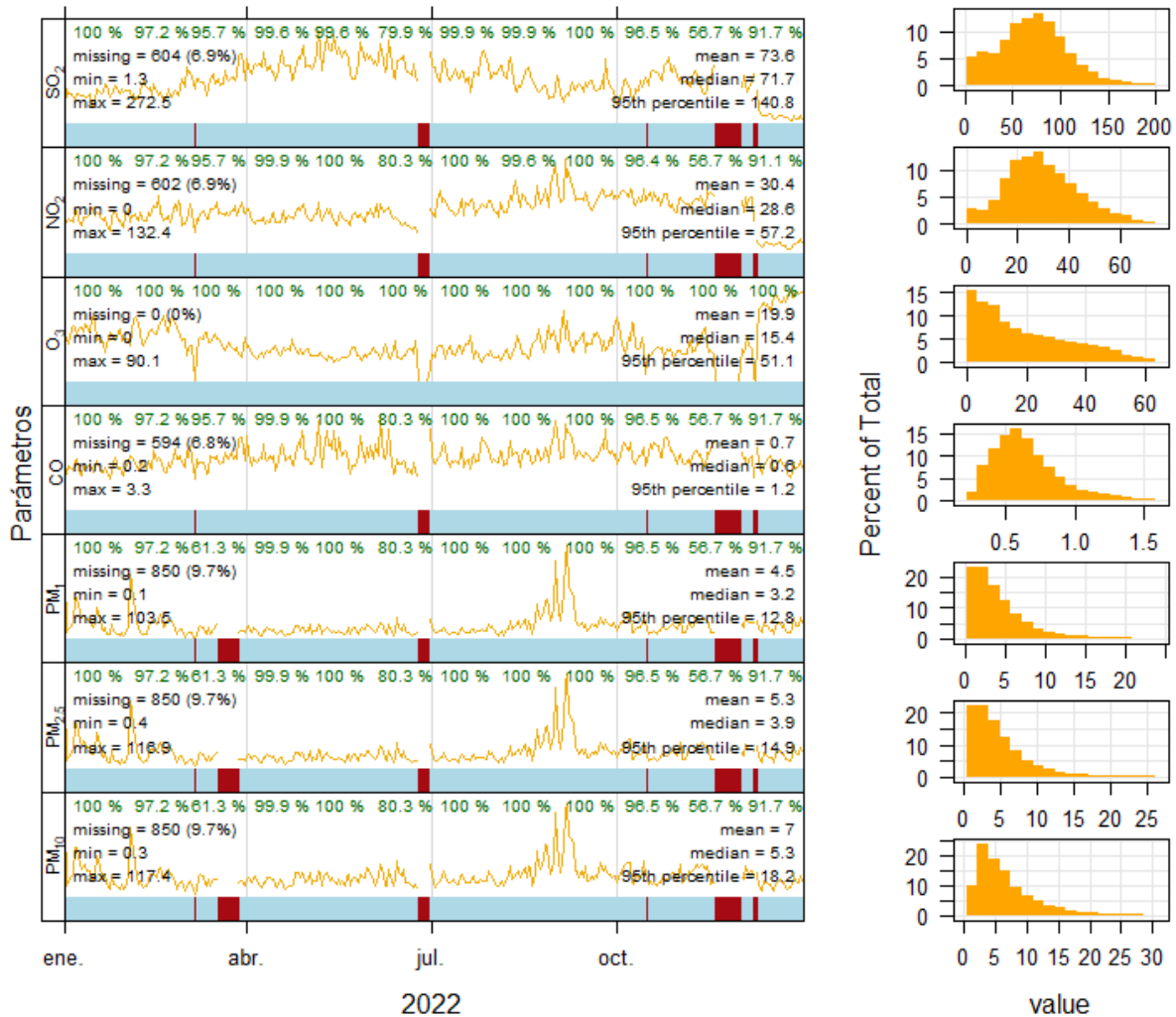


Nota. Elaboración propia.

El microsensador simultáneo de MP₁₀, MP_{2.5} y MP₁, estuvo sin cobertura durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto. Por otra parte, el ozono fue el microsensador que tuvo 100 % de cobertura durante todos los meses.

Figura 59:

Resumen gráfico estación TET monitoreado por (I) durante el 2022

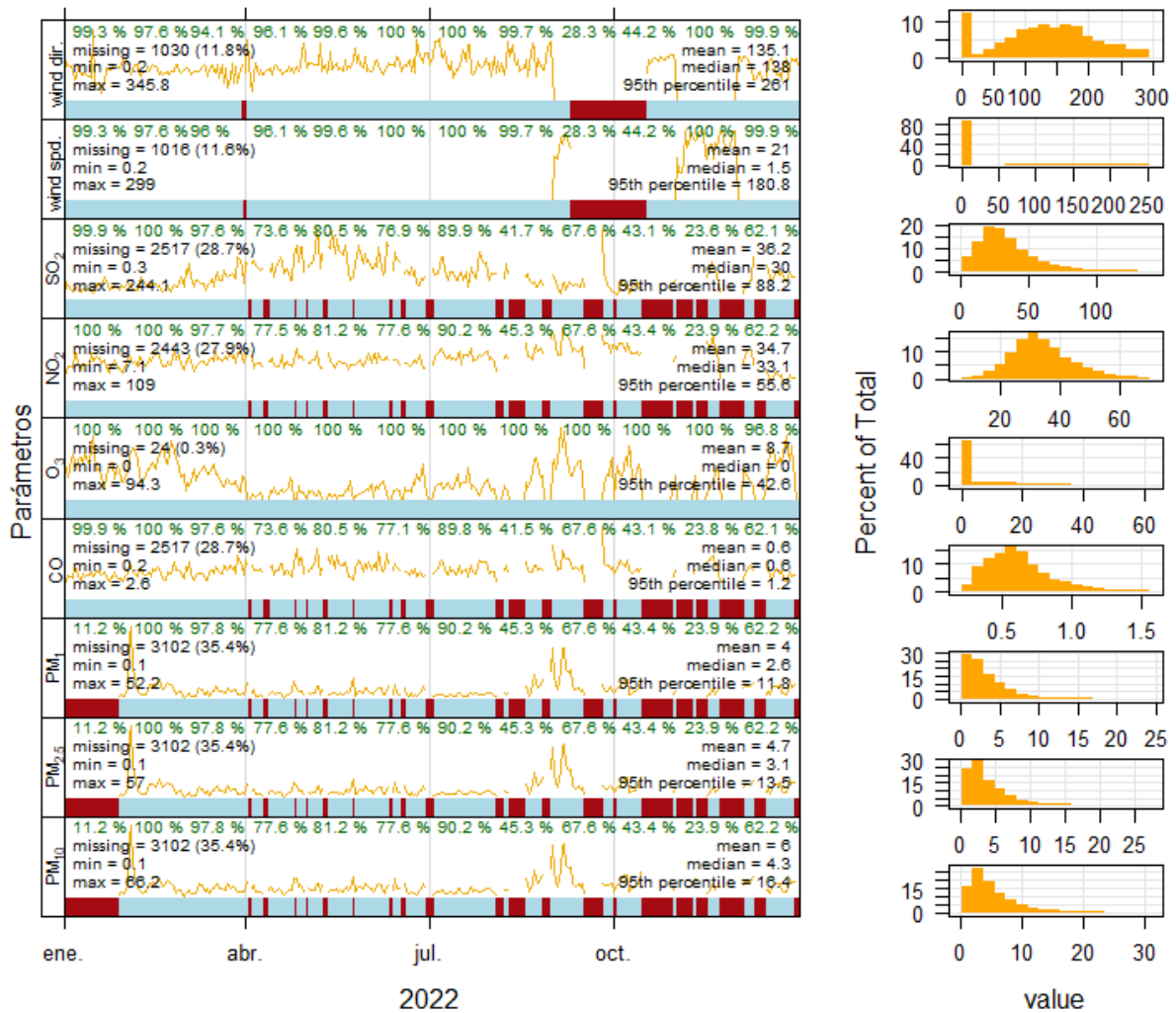


Nota. Elaboración propia.

La estación TET cumple con los criterios de representatividad según lo expresado en la Tabla 9 y 10. Sin embargo, no se cuenta con una estación meteorológica que disponga de valores de velocidad y dirección del viento necesarios para el análisis del presente estudio.

Figura 60:

Resumen gráfico estación MUN monitoreado por (I) durante el 2022



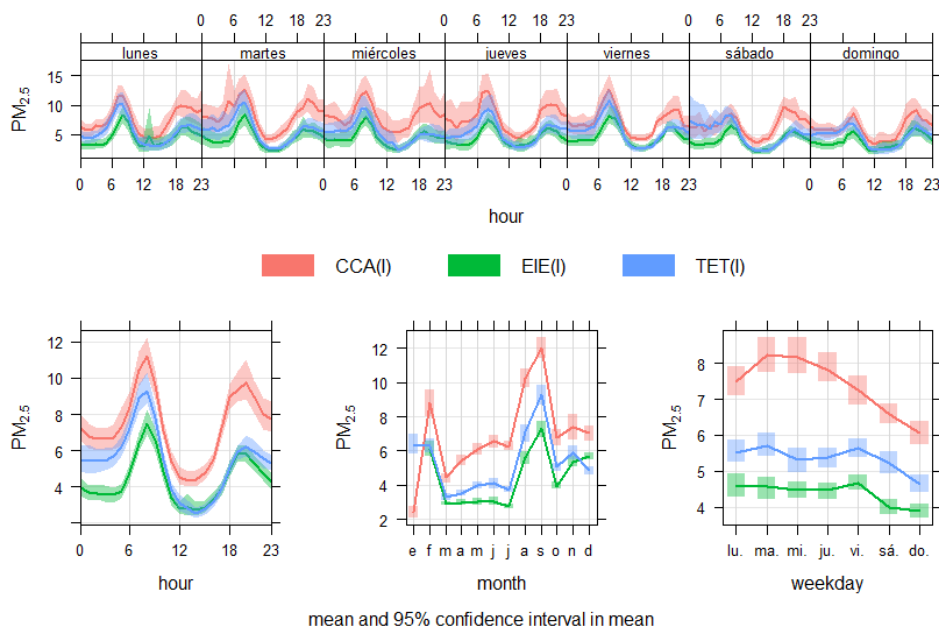
Nota. Elaboración propia.

Los microsensores de la estación MUN no cumple los criterios de representatividad para el análisis de calidad del aire, a excepción del O₃ que sí cumplen tal criterio. Por otra parte, el microsenssor simultáneo de material particulado MP₁₀, MP_{2.5} y MP₁, tuvo menor cobertura que el resto de los microsensores para esta estación.

Anexos 3: Variaciones horarias, diarias y mensuales para las estaciones CCA, EIE y TET monitoreados por (I) durante el 2022

Figura 61:

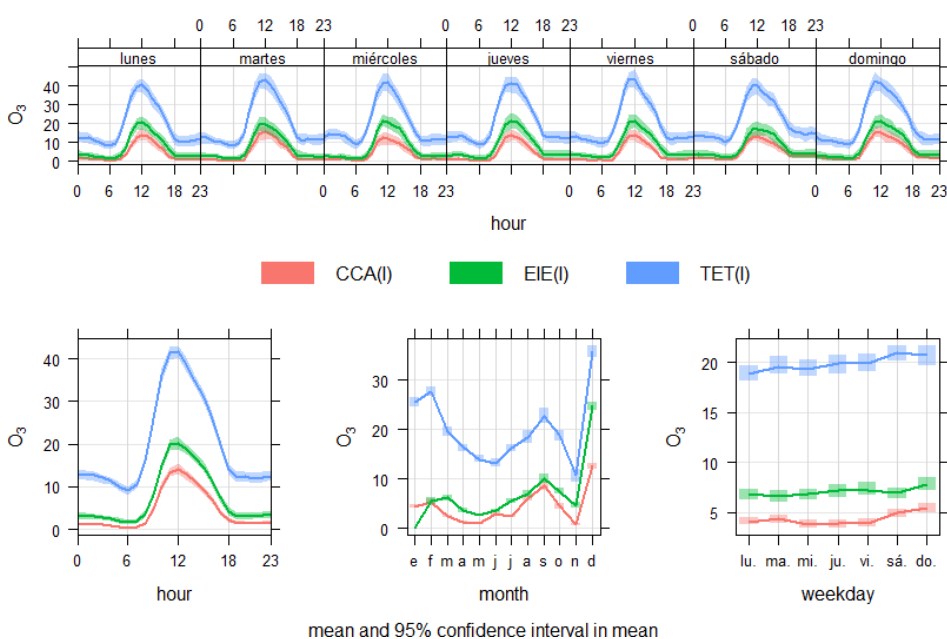
Variación horaria, mensual y diaria de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)



Nota. Elaboración propia

Figura 62:

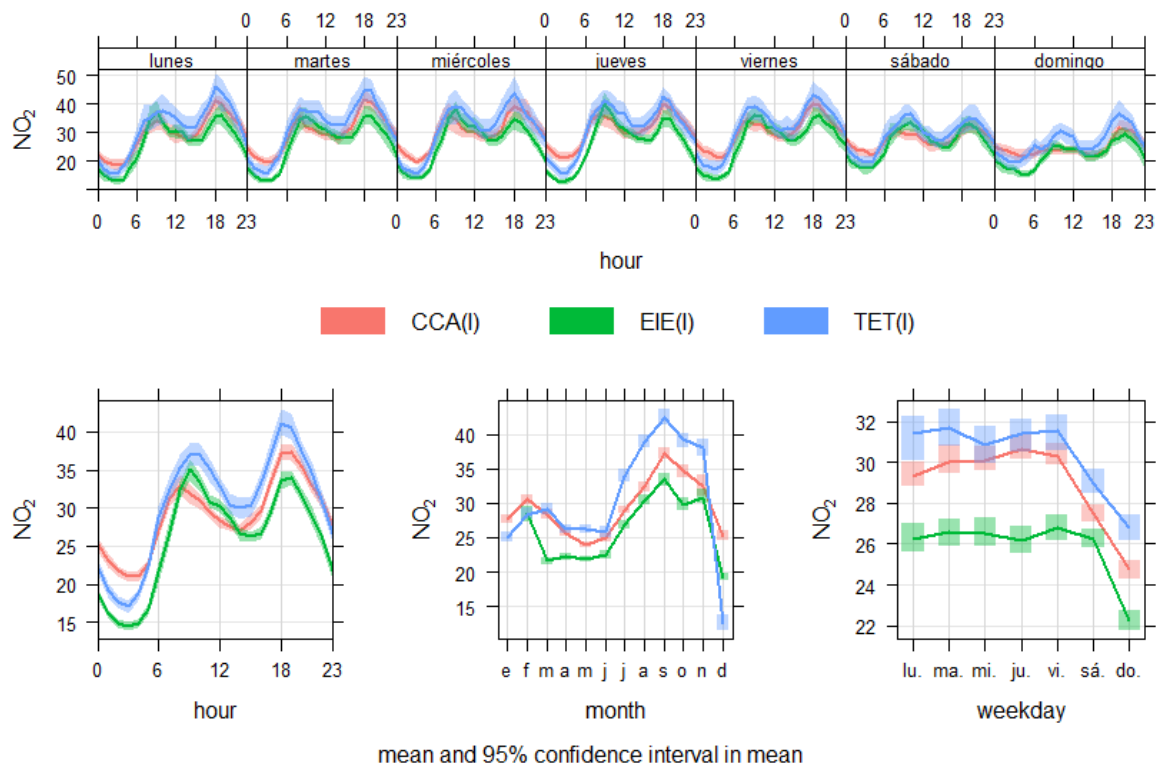
Variación horaria, mensual y diaria de O_3 ($\mu g/m^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)



Nota. Elaboración propia

Figura 63:

Variación horaria, mensual y diaria de O3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) estaciones CCA, EIE y TET por (I)

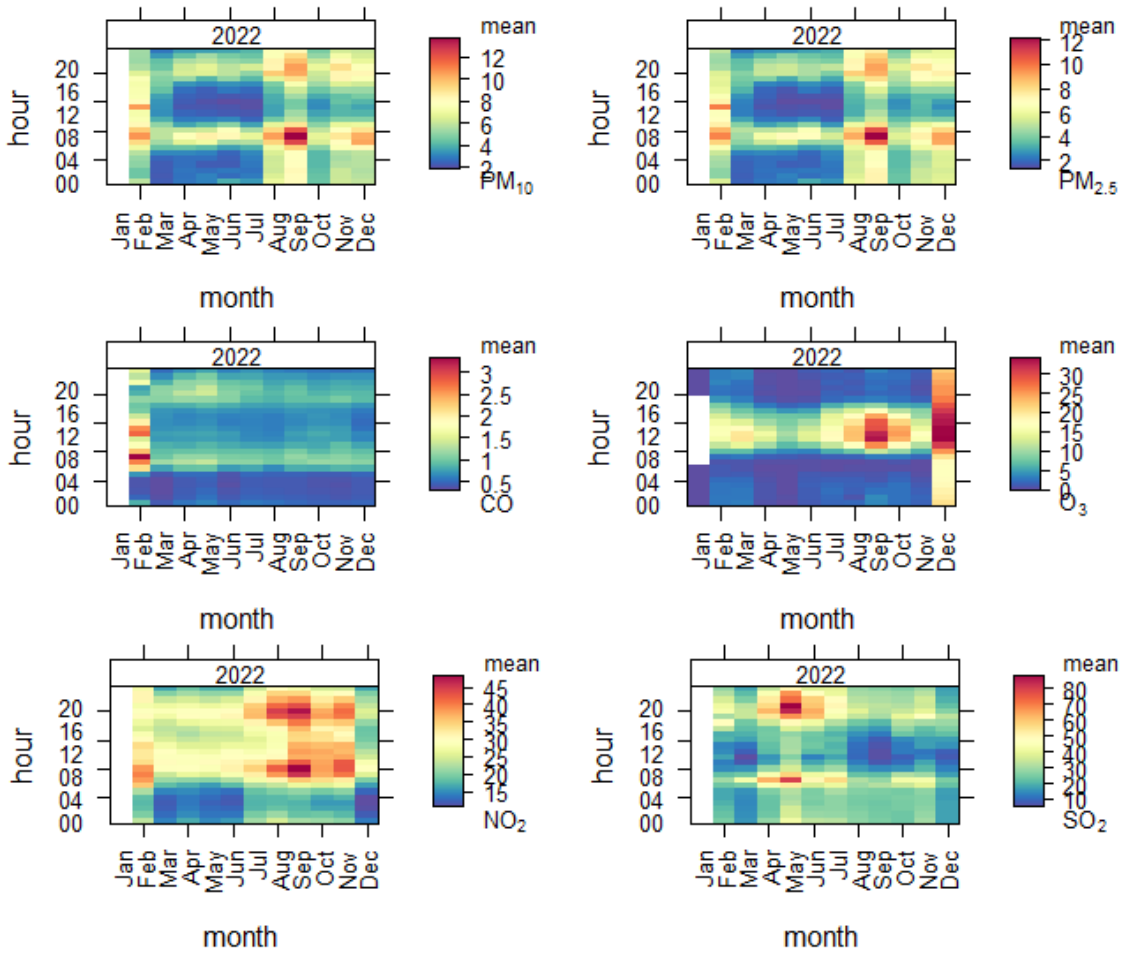


Nota. Elaboración propia

Anexos 4: Mapas de calor horarios y por dirección del viento estación EIE y CCA monitoreados por (I) durante el 2022

Figura 64:

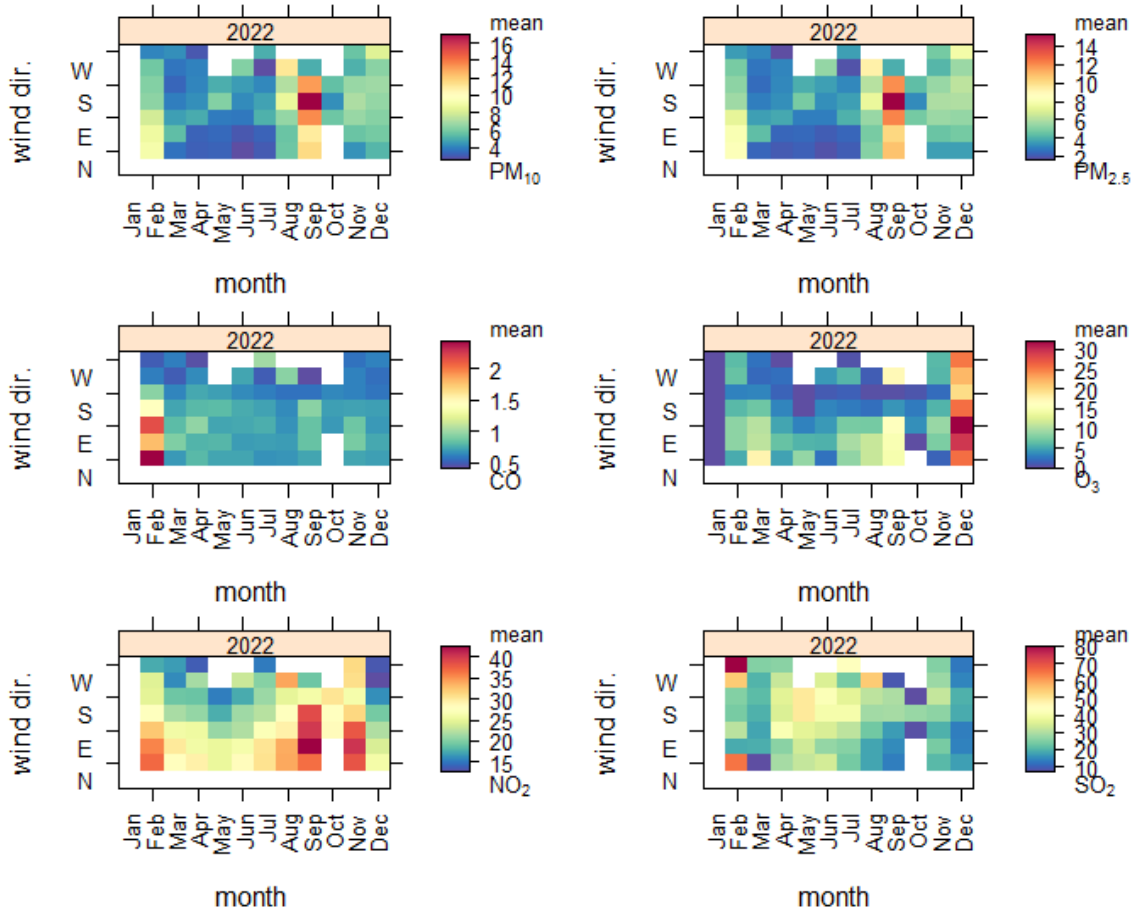
Mapas de calor horarios para la estación EIE monitoreados por (I)



Nota. Elaboracion propia.

Figura 65:

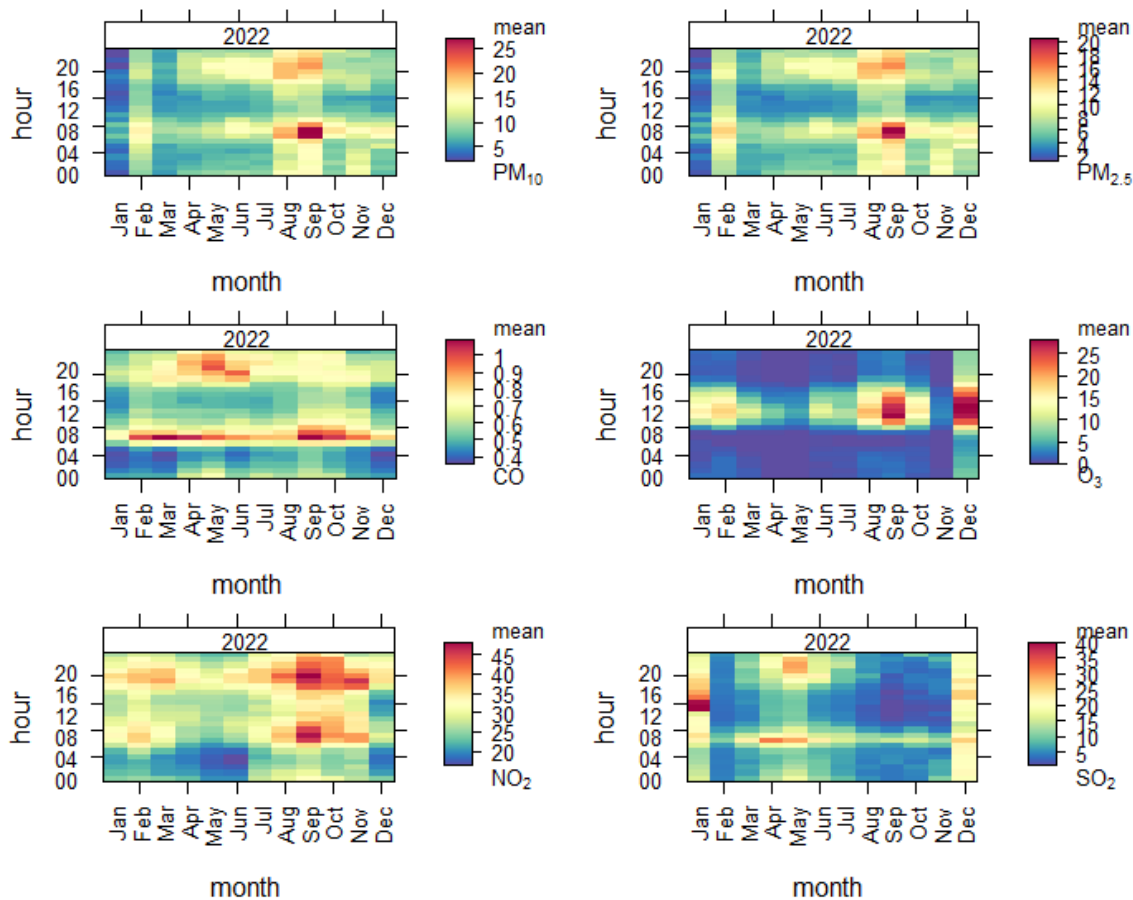
Mapas de calor por dirección del viento para la estación EIE por (I)



Nota. Elaboración propia.

Figura 66:

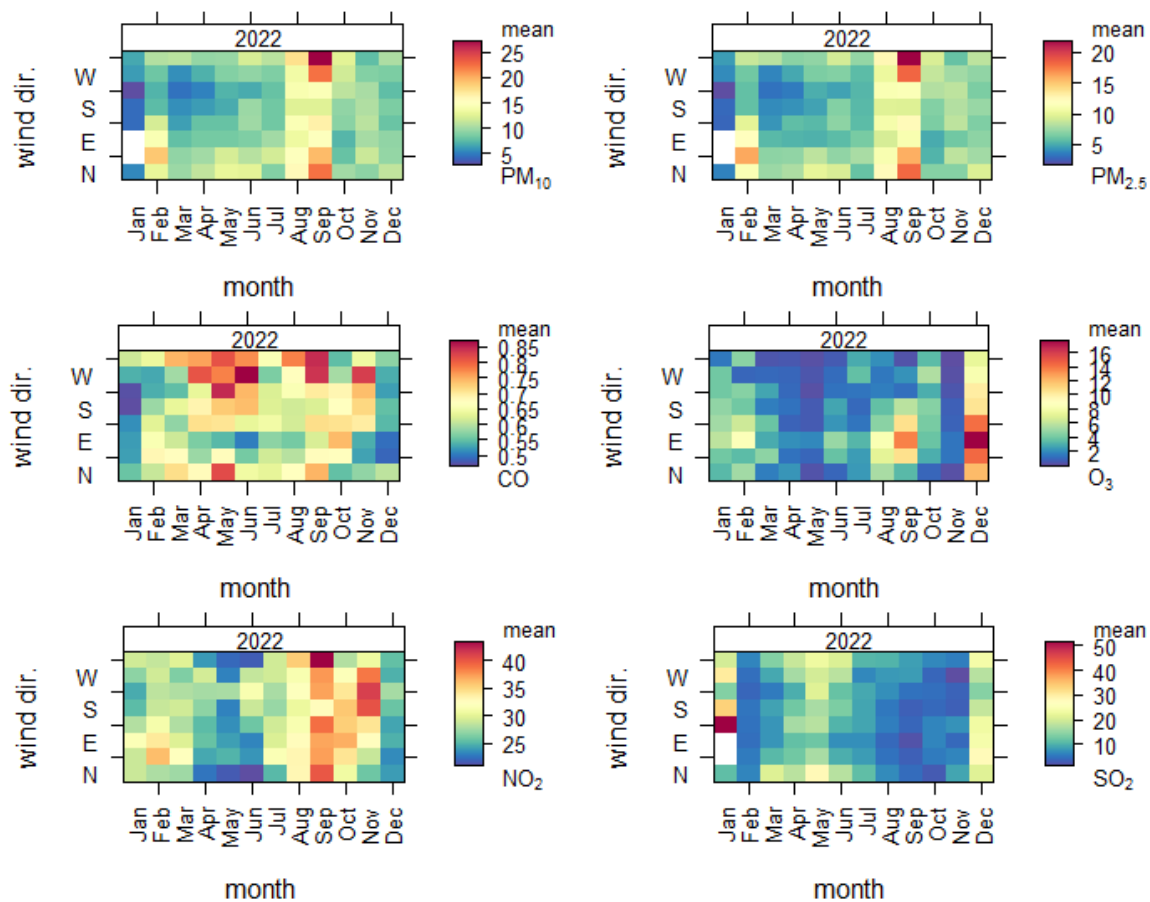
Mapas de calor horarios para la estación CCA por (I)



Nota. Elaboración propia.

Figura 67:

Mapas de calor por dirección del viento para la estación CCA por (I)



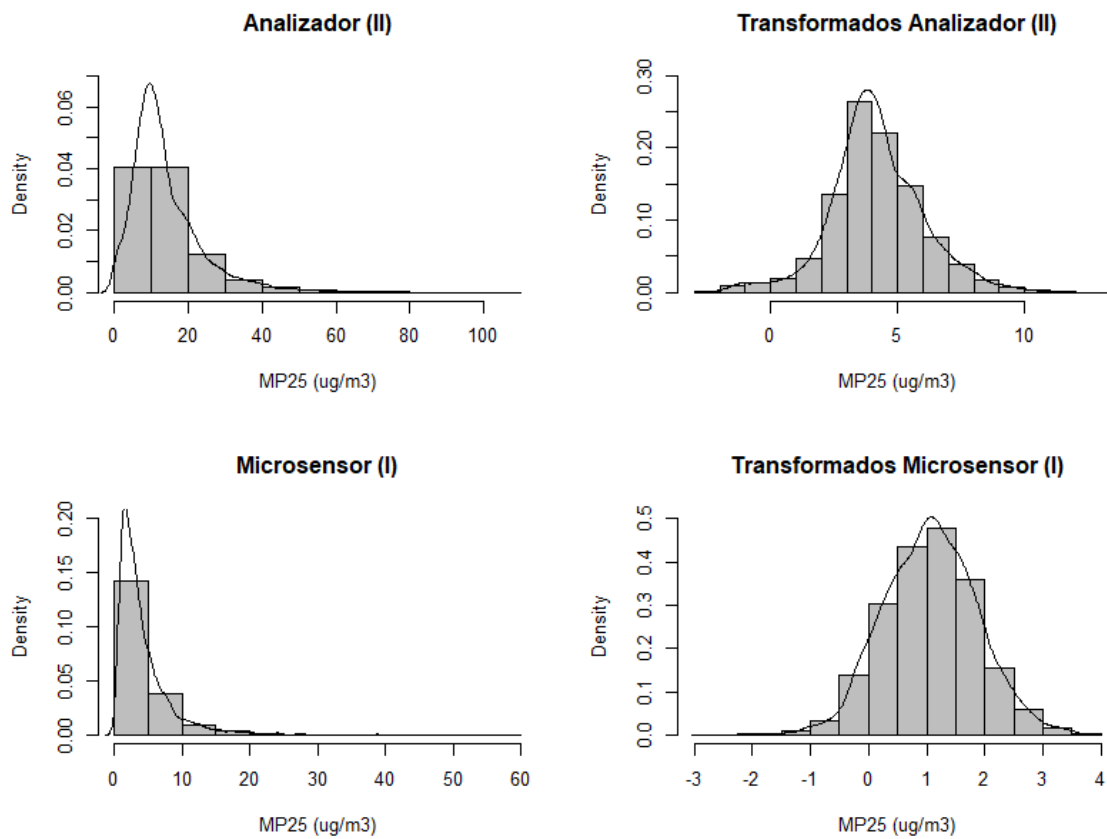
Nota. Elaboración propia.

Anexos 5: Curvas de densidad por (I) y (II) antes y después de la transformación

La Figura 68 muestra las curvas de densidad después de realizar la transformación Box – Cox, donde se visualiza una mejor dispersión de los datos acercándose a la normalidad de los mismos.

Figura 68:

Curvas de densidad $MP_{2.5}$ por (I) y (II)



Nota. Elaboración propia.