



**Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el transporte y concentración de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC)**

Angie Lizeth Pérez Rueda

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Directora

Angela María Rendón Pérez, Doctora (PhD) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

---

Cita

(Pérez Rueda, 2024)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Pérez Rueda, A. (2024). *Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el transporte y concentración de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC)* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

---



Maestría en Ingeniería Ambiental, Cohorte XXXII.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

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

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT .....	7
1. Introducción .....	9
2. Materiales y métodos.....	11
2.1 Zona de estudio .....	11
2.2 Información meteorológica y de calidad del aire.....	12
2.3 Tratamiento y análisis de la información .....	14
3. Resultados y discusión.....	15
3.1 Análisis meteorológico .....	16
3.1.1 Ciclo anual .....	19
3.1.2 Ciclo diurno.....	31
3.1.3 Análisis interanual .....	40
3.2 Análisis de calidad del aire .....	44
3.2.1 Ciclo anual .....	46
3.2.2 Ciclo diurno.....	51
3.2.3 Análisis interanual .....	54
3.3 Exploración de efectos de la variabilidad meteorológica sobre las concentraciones y el transporte de material particulado en la zona de estudio.....	58
3.3.1 Ciclo anual .....	58
3.3.2 Ciclo diurno.....	74
3.4 Posibles estrategias de control y mitigación de la contaminación atmosférica. ....	80
4. Conclusiones.....	82
5. Bibliografía.....	85

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Información de variables de calidad del aire y meteorología-Estaciones de superficie para el período enero 2018 - junio 2022.....	13
Tabla 2. Información satelital de variables meteorológicas (ERA5) y de calidad del aire (CAM5) para el período de estudio 2018-2022. ....	14
Tabla 3. Mediciones meteorológicas-Estaciones de superficie.....	16
Tabla 4. Mapa de calor- Ciclo anual promedio de variables meteorológicas para las estaciones de superficie .....	27
Tabla 5. Mapa de calor- Ciclo diurno de variables meteorológicas-Estaciones de superficie .....	40
Tabla 6. Mediciones de calidad del aire SEVCA_ZCC.....	45
Tabla 7. Prueba de Tukey (Mediciones manuales Vs. automáticas) .....	45
Tabla 8. Coeficientes de regresión lineal entre $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ .....	51
Tabla 9. Ángulos de incidencia para los puntos de monitoreo .....	60
Tabla 10. Coeficientes de correlación entre $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas-estaciones de superficie .....	71
Tabla 11. Coeficientes de correlación entre $PM_{10}$ - $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas- puntos satelitales ...	72

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y características topográficas de la zona de estudio y puntos de monitoreo. ....	12
Figura 2. Diagramas de caja ciclo diurno para variables meteorológicas-Estaciones de superficie .....	18
Figura 3. Ciclo anual de temperatura ambiente.....	20
Figura 4. Ciclo anual de humedad relativa .....	21
Figura 5. Ciclo anual de radiación solar .....	21
Figura 6. Ciclo anual de velocidad del viento .....	22
Figura 7. Rosas de viento anuales-Estaciones de superficie .....	23
Figura 8. Rosas de viento anuales-Puntos satelitales.....	23
Figura 9. Ciclo anual de presión atmosférica .....	24
Figura 10. Ciclo anual de precipitación .....	25
Figura 11. Ciclo anual de cobertura de nubes .....	26
Figura 12. Ciclo anual de altura de capa límite .....	26
Figura 13. Análisis de componentes principales -PCA Puntos Satelitales .....	29
Figura 14. Análisis de componentes principales -PCA Estaciones de Superficie.....	29
Figura 15. Asociación del período de estudio-PCA ciclo anual.....	30
Figura 16. Ciclo diurno de temperatura ambiente .....	31
Figura 17. Ciclo diurno de humedad relativa .....	32
Figura 18. Ciclo diurno de radiación solar .....	33
Figura 19. Ciclo diurno de velocidad del viento .....	34
Figura 20. Rosas de viento horarias -Estación ZM5 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno .....	34
Figura 21. Rosas de viento horarias -Estación ZM6 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno .....	35

Figura 22. Rosas de viento horarias -Estación ZM9 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno .....	35
Figura 23. Rosas de viento horarias -Estación ZM13 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno .....	35
Figura 24. Rosas de viento horarias -Estación ZM3 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno .....	36
Figura 25. Ciclo diurno de presión atmosférica.....	36
Figura 26. Ciclo diurno de precipitación.....	37
Figura 27. Ciclo diurno de cobertura de nubes .....	38
Figura 28. Ciclo diurno de altura de capa límite.....	38
Figura 29. Ciclo diurno de altura de capa límite por trimestre hidrológico .....	39
Figura 30. Comportamiento del índice oceánico del niño ONI .....	41
Figura 31. Evolución interanual 2018-2022 de la temperatura ambiente.....	42
Figura 32. Evolución interanual 2018-2022 de la humedad relativa .....	42
Figura 33. Evolución interanual 2018-2022 de la radiación solar .....	43
Figura 34. Evolución interanual 2018-2022 de la velocidad del viento .....	43
Figura 35. Evolución interanual 2018-2022 de la precipitación.....	44
Figura 36. Ciclo anual de Material particulado $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	46
Figura 37. Media móvil anual $PM_{10}$ .....	47
Figura 38. Media móvil anual $PM_{2.5}$ .....	48
Figura 39. Diferencias en niveles medios por punto de monitoreo .....	49
Figura 40. Análisis de componentes principales PCA a) $PM_{10}$ b) $PM_{2.5}$ .....	50
Figura 41. Ciclo diario de material particulado- $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	52
Figura 42. Análisis categorizado de material particulado por día de la semana- $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	52

Figura 43. Análisis categorizado de material particulado por trimestre- $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ .....	53
Figura 44. Análisis interanual de evolución promedio del $PM_{10}$ .....	54
Figura 45. Análisis interanual de evolución promedio del $PM_{2.5}$ .....	55
Figura 46. Evolución $PM_{10}$ Vs índice de niño oceánico.....	55
Figura 47. Evolución $PM_{2.5}$ Vs índice de niño oceánico .....	56
Figura 48. Diagramas de caja y bigotes anuales- $PM_{10}$ .....	57
Figura 49. Diagramas de caja y bigotes anuales- $PM_{2.5}$ .....	57
Figura 50. Rosas de contaminación totales $PM_{10}$ (Enero 2018-Junio 2022) .....	59
Figura 51. Estimación de ángulos de incidencia.....	60
Figura 52. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico $PM_{10}$ -ZM3.....	62
Figura 53. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico $PM_{10}$ -ZM6.....	63
Figura 54. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico $PM_{10}$ -ZM5.....	64
Figura 55. Rosas de contaminación anuales- $PM_{10}$ .....	66
Figura 56. Matriz de correlaciones a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie.....	67
Figura 57. Mapa de concentración durante episodios de vientos del Sahara – 2018 a 2021.....	69
Figura 58. Puntos calientes y retro trayectorias de masas de aire-2020 .....	70
Figura 59. Coeficientes canónicos estandarizados ACC a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie .	73
Figura 60. Biplot del análisis de correspondencias canónicas a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie .....	74
Figura 61. Efecto de las condiciones meteorológicas en la evolución diaria del MP-Estaciones de superficie .....	75
Figura 62. Efecto de las condiciones meteorológicas en la evolución diaria del MP-Puntos satelitales .....	75
Figura 63. Efecto de la precipitación en las concentraciones horarias de $PM_{10}$ en estaciones de superficie (Horario diurno y nocturno) .....	76

Figura 64.Efecto de la precipitación en las concentraciones horarias de  $PM_{2.5}$  en estaciones de superficie (Horario diurno y nocturno) ..... 77

Figura 65.Anillos de contaminación por trimestre hidrológico  $PM_{10}$ -ZM3 ..... 78

Figura 66.Trayectorias adelantadas de masas de aire- 2020 ..... 79

## RESUMEN

**Título:** Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el transporte y concentración de material particulado PM10 y PM2.5 en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC).

**Palabras clave:** Contaminación atmosférica, material particulado, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, variables meteorológicas, minería, patrones de transporte.

La generación de polvo asociada a las actividades de las operaciones mineras en la zona carbonífera del Cesar (ZCC), constituye una importante fuente de contaminación atmosférica por emisión de material particulado. La autoridad ambiental de la región monitorea de forma continua las concentraciones de material particulado a través del sistema especial de vigilancia de calidad del aire (SEVCA\_ZCC). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos en el reporte de las inmisiones de los contaminantes y la identificación de sus fuentes de emisión, no se evidencian resultados significativos en la mitigación de la contaminación atmosférica, ya que no se analiza de forma integral esta problemática ambiental. El presente trabajo de investigación destaca la importancia de conocer los efectos de las variables meteorológicas en la concentración y transporte del material particulado. Las concentraciones de los contaminantes PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la ZCC, se hacen más críticas entre los períodos secos como diciembre-febrero y temporadas de transiciones secas a lluviosas como marzo-mayo, condiciones moduladas principalmente por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Los meses entre diciembre-mayo corresponden a períodos que a pesar de registrar condiciones meteorológicas que favorecen el desarrollo turbulento (altas temperaturas, radiación solar y alta altura de capa límite), se ven muy afectados por los incendios forestales locales y regionales, por lo cual se nota un aumento en los niveles de los contaminantes. De las condiciones meteorológicas analizadas, la temperatura ambiente registra las relaciones directas más altas con el material particulado, denotando un aumento en los niveles del material con las temperaturas más altas, lo cual se relaciona con fenómenos de inversión térmica durante el horario nocturno. Por otro lado, el efecto de lavado atmosférico es seguramente el fenómeno más conocido en la interacción de variables meteorológicas con el material particulado, efecto notado en mayor medida durante períodos lluviosos como septiembre-noviembre. Sin embargo, se evidencia la influencia diferenciada de este efecto dependiendo del horario de registro de los eventos de precipitación, con una mayor eficiencia de lavado durante las horas con presencia de luz solar. Durante el período de estudio (enero 2018-junio 2022), el año 2019 se posiciona como el período de concentraciones más altas en la ZCC, detonando la relación de este hallazgo con la influencia del fenómeno del niño y resaltando la alta interdependencia encontrada entre el índice de este fenómeno con la variabilidad interanual tanto de las variables meteorológicas como del material particulado. Finalmente, el impacto regional de los contaminantes con origen en la Zona Carbonífera del Cesar, muestran un impacto de menor alcance durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, notando una influencia concentrada en el centro de Colombia. Durante los meses restantes se observan trayectorias de masas de aire con alcances regionales que afectan principalmente a Panamá y comunidades aledañas.

## ABSTRACT

**Title:** Influence of meteorological conditions on the transport and concentration of PM10 and PM2.5 particulate matter in the Coal Zone of Cesar (ZCC).

**Keywords:** Air pollution, Particulate matter, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, meteorological variables, coal mining, pathways.

The generation of dust associated with the activities of mining operations in the Cesar coal zone constitutes an important source of atmospheric pollution due to the emission of particulate matter. The regional environmental authority continuously monitors the concentrations of particulate matter through the special air quality surveillance system. However, despite the efforts in reporting the immissions of pollutants and identifying their emission sources, no significant results are evident in the mitigation of atmospheric pollution, since this environmental problem is not comprehensively analyzed. The present research work highlights the importance of knowing the effects of meteorological variables on the concentration and transport of particulate matter. Historically, the concentrations of pollutants PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in the Cesar coal zone become more critical between dry periods such as December-February and seasons of dry to rainy transitions such as March-May. These months correspond to periods that, despite recording meteorological conditions that favor turbulent development (high temperatures, solar radiation, and high boundary layer height), are greatly affected by local and regional forest fires, which is why an increase is noted in the pollutants levels. Temperature records the highest direct relationships with particulate matter, denoting an increase in particulate matter levels with higher temperatures, a fact related to thermal inversion phenomena during the night. On the other hand, the atmospheric washing effect is the best-known phenomenon in the interaction of meteorological variables with particulate matter, and a greater effect is noticed during rainy periods such as September-November. However, a different impact of this effect is evident depending on the time of recording precipitation events, with a greater washing efficiency during hours with the presence of sunlight. From January 2018 to June 2022, the year 2019 is positioned as the period of highest concentrations, triggering the relationship of this finding with the influence of the El Niño phenomenon and highlighting the high interdependence found between the index of this phenomenon with the interannual variability both of meteorological variables and particulate matter. Finally, the regional impact of pollutants originating in the Cesar coal zone shows a smaller impact during September, October, and November, noting a concentrated impact in central Colombia. During the remaining months, air mass trajectories with regional reach are observed that mainly affect Panama and surrounding communities.

## 1. Introducción

El carbón es uno de los minerales más usados en el mundo y aunque actualmente se enfrenta a un panorama cambiante debido a los compromisos de cambio climático, la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) pronosticó que la demanda mundial seguirá en aumento con respecto a los niveles de 2020 por lo menos por una década más (International Energy Agency, 2021). Regiones como China, Estados Unidos, Australia y África poseen grandes porcentajes de la reserva de carbón a nivel mundial, mientras que Colombia se destaca por ocupar el primer puesto en Latinoamérica (Rojano, Manzano, et al., 2018).

En Colombia, la explotación de carbón durante el quinquenio del 2016 al 2020 representó en promedio, el 1% del producto interno bruto (PIB) nacional y el 16% de las exportaciones del país (DANE, 2023). En 2019, la explotación de este mineral contribuyó con 600 mil millones de pesos en impuesto de renta, 1.9 billones de pesos en regalías y generó 130,000 empleos (Bustamante et al., 2021). Sin embargo, una débil legislación en el ámbito ambiental, social y territorial para las empresas mineras, ha desencadenado diversos problemas socio-ambientales relacionados con la contaminación o uso indiscriminado de las matrices de agua, suelo y aire, así como la afectación a ecosistemas protegidos, el deterioro a la salud humana y el desplazamiento de comunidades (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022; Represa et al., 2019).

En particular, el departamento del Cesar se ha consolidado como uno de los principales productores nacionales de carbón. Durante el primer trimestre del año 2019, este departamento produjo el 64% del total nacional de este mineral y representa más del 35% del PIB y el 70% de las exportaciones en el departamento (Agencia Nacional de minería, 2019). La explotación del carbón ocurre en su mayoría con tecnología a cielo abierto en el Cesar, metodología que se relaciona directamente con la generación de material particulado, resultado de actividades como voladuras, remoción de capa vegetal y uso de maquinaria pesada para el transporte del mineral y material inerte (Liu & Liu, 2020).

El material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  corresponde a partículas con un tamaño aerodinámico inferior a 10  $\mu m$  y 2.5  $\mu m$ , respectivamente. El  $PM_{10}$  es capaz de ingresar a través de las vías respiratorias al cuerpo humano. Sin embargo, solo el  $PM_{2.5}$  logra ser lo suficientemente fino para penetrar y permanecer en los alvéolos pulmonares, causando múltiples afecciones tales como bronquitis crónica, crisis de asma, cáncer de pulmón e incluso accidentes cerebrovasculares al ingresar al torrente sanguíneo (Lu et al., 2020).

En el mundo, según el último reporte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que el 58% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica, se asocian a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 18% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica e infecciones respiratorias agudas, y el 6% de las muertes se debieron al cáncer de pulmón (World Health Organization, 2021). En Colombia, el Departamento Nacional de Planeación, estimó que la mala calidad del aire es la causa de más de 8 mil muertes anuales, con costos asociados alrededor de los 12.2 billones de pesos, cifra que equivale al 1.5 % del PIB nacional (Ministerio de salud y protección social, 2021).

Con el objetivo de realizar un seguimiento a la contaminación atmosférica de la Zona Carbonífera del Cesar (en adelante ZCC), la autoridad ambiental del departamento del Cesar (Corpocesar), diseñó e instaló un sistema integrado de vigilancia de meteorología y calidad del aire que se encuentra en operación desde el año 2007 (Agencia Nacional de minería, 2019). Sin embargo, es crucial realizar análisis integrales que permitan comprender los procesos asociados con la dispersión de los contaminantes y su relación con la meteorología, para lograr una mejor planificación y toma de decisiones en la región (Wu & Zhang, 2018).

Múltiples estudios han demostrado una fuerte influencia de la meteorología sobre las condiciones de la calidad del aire en diferentes ciudades y otros territorios. Una investigación realizada en Zhengzhou-China, demostró que la calidad del aire más deficiente se registra en invierno, con condiciones de alta humedad, y bajas temperaturas y velocidades del viento (Gao et al., 2021). Por otra parte, un estudio realizado en una operación minera ubicada en la Guajira-Colombia, evidenció que variables como precipitación y humedad relativa presentaron correlaciones negativas con el contaminante PM<sub>10</sub>, mientras que la temperatura ambiente mostró una correlación positiva, destacando en todos los casos coeficientes de correlación inferiores a +/- 0.31 (Rojano, Manzano, et al., 2018). En Melbourne-Australia, un estudio encontró que la meteorología local tiene una influencia de alrededor de un 21.1% en las variaciones del PM<sub>10</sub>, identificando a la temperatura como la variable de mayor influencia (Pearce et al., 2011). Se destaca que en diferentes ciudades del mundo, se han reportado correlaciones tanto positivas como negativas entre la temperatura y el material particulado (MP) (Chen et al., 2020; Kayes et al., 2019). La diversidad en los resultados responde a las características propias de cada región, como la topografía del lugar, las fuentes de emisiones y las variaciones en los aportes de dichas fuentes durante temporadas específicas (Duarte et al., 2022).

La variabilidad en las condiciones meteorológicas no solo afecta las inmisiones de los contaminantes sino que incide de manera directa en sus patrones de transporte (Henao et al., 2021). Una investigación realizada en Beijing y Hebei en China, muestra que los transportes regionales contribuyeron a las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en un porcentaje entre el 32.5% y 68.4% durante el 2017. De igual manera, encontraron que durante la primavera y el invierno, los cambios en las condiciones meteorológicas tuvieron un impacto del 40% en las variaciones del transporte regional del contaminante (Dong et al., 2020).

La extracción a cielo abierto implica un mayor deterioro de la calidad del aire debido a la naturaleza de la operación; un mayor monitoreo de dicha matriz ambiental (Liu & Liu, 2020). Sin embargo, con base en los resultados de modelaciones de receptor realizadas en la ZCC, existen aportes de MP de fuentes ajenas al proceso de explotación del carbón, entre las que se encuentran la quema de residuos, la quema de biomasa como combustible e incendios forestales asociados a la temporada de sequía, el polvo suspendido en las vías y las emisiones fugitivas de vehículos (M. Morales, 2018). Adicionalmente, fenómenos meteorológicos como la intrusión de polvo del Sahara están bien documentados en la ZCC (Méndez et al., 2018). El desierto del Sahara es una de las principales fuentes de material particulado en el mundo, y tiene la capacidad de afectar la calidad del aire a miles de kilómetros de la fuente en ciertas condiciones meteorológicas (Rojano et al., 2021).

En este contexto, y partiendo del conocimiento disponible acerca de las relaciones entre las variables meteorológicas y del MP en otras regiones del mundo (Gao et al., 2021; Nogarotto & Pozza, 2020), es imperativo el estudio de las relaciones entre la meteorología y los niveles y patrones de transporte del MP en la ZCC, entendiendo que las características particulares de esta zona en la región Caribe Colombiana, pueden dar lugar a interacciones particulares entre la meteorología y la calidad del aire en la región.

Este trabajo de investigación busca mejorar el entendimiento de los efectos de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento) sobre la evolución espacio-temporal del material particulado en la ZCC, analizar las condiciones meteorológicas en períodos críticos y su influencia en la trayectoria de los contaminantes. Los resultados de esta investigación proporcionan información útil para direccionar los esfuerzos en la mitigación de la contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en la zona carbonífera del Cesar.

La estructura de este documento se compone de varias secciones que proporcionarán una visión integral del trabajo de investigación. En la sección dos se presentan los materiales y métodos, donde se describe la zona de estudio, la recopilación de la información y los métodos empleados para el tratamiento de esta. Seguidamente, en la sección tres se presentan los resultados obtenidos a partir de nuestra investigación en cada etapa del trabajo. Finalmente, en la sección de conclusiones se resumen las implicaciones clave de nuestros hallazgos, destacando las contribuciones principales y las recomendaciones para futuras investigaciones.

## **2. Materiales y métodos**

Esta sección sustenta la validez y la reproducibilidad de los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación. Se relaciona la descripción de la zona de estudio, junto con su contexto geográfico y características socio-económicas principales. Posteriormente, se presenta una explicación minuciosa de la recopilación, análisis y tratamiento de la información, subrayando que la ruta metodológica involucra cuatro fases orientadas a estudiar la influencia de las condiciones meteorológicas sobre el transporte y concentración del material particulado (MP) en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC). Las cuatro fases de la ruta metodológica están enfocadas de la siguiente manera:

- 1-Análisis del comportamiento de variables meteorológicas de interés en diferentes escalas temporales.
- 2-Estudio de las dinámicas espaciales y temporales de las concentraciones de contaminantes atmosféricos.
- 3-Exploración de efectos de la variabilidad meteorológica sobre las concentraciones y el transporte de material particulado en la región de estudio.
- 4-Discusión de estrategias de control y mitigación de la contaminación atmosférica en la ZCC.

### **2.1 Zona de estudio**

La Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) se encuentra localizada en el centro del departamento del Cesar, entre los 9.3° y 9.9° de latitud norte y los -73.6° y -73.2° de longitud oeste, con una elevación promedio entre los 40 y los 150 msnm. La zona de explotación minera está conformada por los municipios de El Paso, La Jagua de Ibirico, Chiriguaná y Becerril, con una superficie de 3,902 km<sup>2</sup> y una población de 56,500 habitantes; región donde el 70% de la población pertenece a la comunidad afrodescendiente (DANE, 2021).

En la Figura 1 se observan las características topográficas de la región de estudio, notando que la ZCC es un terreno plano rodeado de topografía compleja, particularmente al norte y al este de la zona de interés para los análisis. En particular, al este está la Serranía del Perijá y al noroeste se encuentra localizada la Sierra Nevada de Santa Marta, con elevaciones de hasta 4,000 msnm. La vegetación predominante en la zona está compuesta principalmente por arbustos y matorrales. Entre los cuerpos de agua más importantes se destacan los ríos Sororia y Pajuil, y lagunas como La Pachita y Mata de Palma (M. Morales, 2018).

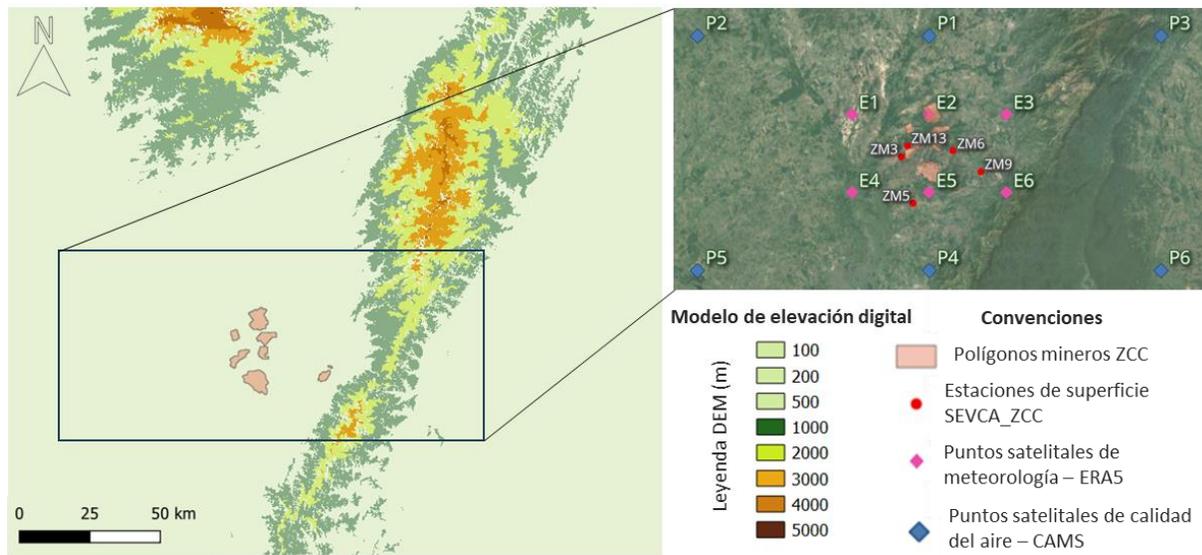


Figura 1. Ubicación y características topográficas de la zona de estudio y puntos de monitoreo.

En la ZCC se desarrollan actividades de explotación minera desde hace más de 30 años. Actualmente operan multinacionales mineras como Drummond SAS, CI PRODECO y Colombian Natural Resources CNR, con una producción aproximada de 13.3 millones de toneladas de carbón durante el primer trimestre del año 2019 (Agencia Nacional de minería, 2019). La tecnología de explotación es a cielo abierto, condición que resulta atractiva a las empresas debido a las características del manto de carbón y a su rentabilidad con respecto a la minería subterránea (Liu & Liu, 2020).

## 2.2 Información meteorológica y de calidad del aire

El sistema de vigilancia de la zona carbonífera del César (SEVCA ZCC) realiza un seguimiento continuo del estado de la calidad del aire en la región. El sistema cuenta con catorce (14) puntos de monitoreo conformados por instrumentos automáticos y manuales para la medición de variables meteorológicas y de calidad del aire, particularmente  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Las mediciones reportadas por el sistema de monitoreo son de carácter público y de manera mensual son publicadas en el subsistema de información SISAIRE (CORPOCESAR, 2021). Para la selección del período de análisis y las estaciones de monitoreo, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Estaciones de monitoreo que no fueran objeto de reubicación y/o cambio de tecnología de medición en el período de estudio seleccionado.
- Estaciones de monitoreo que contarán con información en simultáneo de calidad del aire y meteorología en frecuencia horaria.
- Disponibilidad de información superior al 80% en el período de estudio seleccionado.

Luego de realizar la revisión de los criterios anteriormente mencionados, se encontró que de las 14 estaciones que conforman al sistema, cinco de ellas (ZM3, ZM6, ZM9, ZM5 y ZM13) cumplían con los

criterios de selección en el período entre enero 2018 y junio 2022. Resulta importante mencionar que solo se reportan datos del 36% de las estaciones existentes debido a la exclusión de la mayoría por el no cumplimiento de los factores de selección definidos, los cuales se fijaron con el objetivo de disminuir la incertidumbre en los análisis realizados.

Para el desarrollo de la investigación, se recopiló información de dos fuentes de información diferentes, estaciones en superficie pertenecientes al SEVCA\_ZCC e información satelital. Las variables meteorológicas estudiadas fueron: humedad relativa, temperatura del aire, radiación solar, presión atmosférica, precipitación, y velocidad y dirección del viento. Con respecto a los contaminantes atmosféricos se recopiló información de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. La información se obtuvo para el período comprendido entre enero de 2018 y junio de 2022. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la selección de este período obedece a la disponibilidad y calidad de la información requerida para los análisis.

La Figura 1 muestra la ubicación de las cinco estaciones de superficie seleccionadas, identificadas en color rojo y con las iniciales ZM (Zona Minera). Estas estaciones pertenecen al SEVCA\_ZCC, cumplen los lineamientos de instalación de la organización meteorológica mundial (OMM) y los lineamientos del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Ministerio de Ambiente, 2010). En la Tabla 1 se presenta el detalle de las variables medidas en cada punto seleccionado (*Ver detalle de disponibilidad de la información Tabla 3 y 8*).

*Tabla 1. Información de variables de calidad del aire y meteorología-Estaciones de superficie para el período enero 2018 - junio 2022*

<b>Estaciones</b>	<b>Red de monitoreo</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>UNIDADES</b>
ZM3, ZM6, ZM9, ZM5	SEVCA_ZCC	PM <sub>10</sub>	$\mu g/m^3$
		PM <sub>2.5</sub>	$\mu g/m^3$
ZM13	SEVCA_ZCC	PM <sub>10</sub>	$\mu g/m^3$
ZM3, ZM6, ZM9, ZM5, ZM13	SEVCA_ZCC	Temperatura ambiente	°C
		Humedad relativa	%
		Presión atmosférica	mmHg
		Dirección del viento	°
		Velocidad del viento	m/s
		Precipitación	mmH <sub>2</sub> O
		Radiación solar	W/m <sup>2</sup>

Adicionalmente a la información de las estaciones en superficie, se analizó información satelital tanto para las variables meteorológicas como para las de calidad del aire. La información satelital de calidad del aire fue obtenida de las bases de datos de Copernicus, específicamente del Servicio de Monitoreo Atmosférico CAMS (por sus siglas en inglés) (<https://atmosphere.copernicus.eu/charts/packages/cams/>), mientras que la información meteorológica se obtuvo del reanálisis climático ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-daily-era5-statistics?tab=app>).

Teniendo en cuenta la resolución de ambos conjuntos de datos, que para ERA5 es de 0.25° y para CAMS de 0.75°, en la Figura 1 se observa la cuadrícula utilizada para la descarga de información en ambos casos. Los dos puntos satelitales seleccionados (P1 y P4) fueron elegidos verificando que tuvieran la mayor

cercanía a las estaciones de superficie, que compartieran características topográficas similares y que el punto de la cuadrícula contará con datos tanto en ERA5 y CAMS.

Además de las variables medidas en las estaciones en superficie, de este conjunto de datos satelitales se involucran adicionalmente dos variables que no se miden en estas estaciones del SEVCA\_ZCC y que contribuyen a los análisis, que son cobertura de nubes y altura de capa límite atmosférica (CLA). La información satelital fue ajustada a la zona horaria de Colombia (UTC-5) para realizar comparaciones de referencia. A continuación, en la Tabla 2 se presentan las variables seleccionadas para cada punto satelital junto con el conjunto de datos de origen.

Dada las diferencias en las fuentes de información involucradas, los análisis se realizaron para cada conjunto de datos por separado (estaciones de superficie y puntos satelitales), con el objetivo de explorar las relaciones entre las condiciones meteorológicas (variables explicativas) y los contaminantes atmosféricos (variables respuesta).

*Tabla 2. Información satelital de variables meteorológicas (ERA5) y de calidad del aire (CAMS) para el período de estudio 2018-2022.*

Puntos	Conjunto de datos	Variables	Unidades
P1, P4	CAMS	PM <sub>10</sub>	$\mu g/m^3$
		PM <sub>2.5</sub>	$\mu g/m^3$
P1,P4	ERA5	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
		Presión atmosférica	<i>mmHg</i>
		Velocidad del viento	<i>m/s</i>
		Dirección del viento	$^{\circ}$
		Altura de capa límite	<i>m</i>
		Cobertura de nubes	<i>Adimensional</i>
		Precipitación	<i>mmH<sub>2</sub>O</i>
Radiación solar	<i>W/m<sup>2</sup></i>		

### 2.3 Tratamiento y análisis de la información

El tratamiento y análisis de la información fueron realizados utilizando Microsoft Excel® 2021 (Microsoft Corp., Redmond, WA) y R-Studio ([www.rstudio.org](http://www.rstudio.org), Boston, MA) utilizando la herramienta de calidad del aire “OpenAir” (Carslaw & Ropkins, 2012).

De manera inicial y dada la fuerte estacionalidad de la meteorología colombiana modulada por el viaje de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y la influencia anteriormente mencionada de la meteorología sobre el transporte de contaminantes (Dong et al., 2020; Henao et al., 2021), se realiza un análisis exploratorio del comportamiento de las variables meteorológicas y de calidad del aire en diferentes escalas temporales, correspondientes al ciclo anual y el ciclo diario.

Las concentraciones del material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> fueron comparadas con los estándares normativos colombianos de calidad del aire vigentes, según la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (promedio anual para PM<sub>10</sub> de 50  $\mu g/m^3$  y para PM<sub>2.5</sub> de 25  $\mu g/m^3$ , y

promedio diario para  $PM_{10}$  de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para  $PM_{2.5}$  de  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - media aritmética). De igual manera, fueron comparadas con los valores máximos permisibles recomendados por la Organización Mundial de la Salud en el 2021 (media anual para  $PM_{10}$  de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para  $PM_{2.5}$  de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Las relaciones entre las condiciones meteorológicas y las concentraciones de material particulado fueron exploradas con un análisis no paramétrico de correlación de Spearman, que permite determinar la fuerza y dirección de la asociación entre dos variables. Los efectos de la dirección y velocidad del viento fueron evaluados utilizando la herramienta "Polarplot" de R-Studio (Rojano, Arregoces, et al., 2018). Además, se usaron herramientas de estadística multivariada como el análisis de correlaciones canónicas (CCA), que permite establecer las interacciones entre un grupo de variables explicativas y variables respuesta. De igual manera, con el análisis de componentes principales (PCA) se muestra el detalle de la fuerza y dirección entre las interacciones de múltiples variables y permite establecer grupos de mediciones con características similares. A diferencia de métodos que analizan el efecto individual (Balogun et al., 2021), estos métodos multivariados permiten identificar relaciones múltiples multivariadas de manera simplificada gracias al poder gráfico que presentan (Masood & Ahmad, 2021; Nogarotto & Pozza, 2020).

Adicionalmente, se implementó el Modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (HYSPLIT; <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>), para simular las trayectorias hacia adelante y hacia atrás, de transporte de partículas en la atmósfera. Las trayectorias hacia adelante fueron calculadas durante un día con intervalos de 3 horas, reportados de la siguiente manera (00:00h-06:00h, 06:00h-12:00h, 12:00h-18:00h, 18:00h-00:00h), lo anterior se realizó para dos alturas diferentes dentro de la capa límite (500 m-1000 m), utilizando la información meteorológica del Reanálisis NCEP/NCAR (Rolph et al., 2017; Stein et al., 2015) y fijando el origen de las masas de aire en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC).

Por otro lado, con el objetivo de estudiar los aportes de material particulado asociado con la ocurrencia de los incendios forestales, se integraron las retrotrayectorias (trayectorias hacia atrás) con la información de puntos calientes del conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles (VIIRS), de acuerdo con (Henaó et al., 2021). Estos puntos calientes se refieren a puntos asociados con la ocurrencia de incendios que son reportados constantemente por el sistema de gestión de recursos FIRMS de la NASA (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). Las retrotrayectorias fueron definidas para dos alturas diferentes (500 m-1000 m) con las rutas resultantes durante 24 horas calculadas cada 3 horas (00:00h-06:00h, 06:00h-12:00h, 12:00h-18:00h, 18:00h-00:00h). Las trayectorias resultantes y los puntos calientes identificados fueron integrados con QGIS versión 3.34.0 RC (<https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>).

### 3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología propuesta en el presente trabajo de investigación. Inicialmente se analizan las condiciones meteorológicas para la región de estudio, haciendo especial énfasis en las escalas temporales anual y diurna. La selección de estas escalas obedece a la relevancia de estas en el transporte de contaminantes en la región. Adicionalmente se examinan algunas condiciones en la escala interanual relacionadas con el ENSO, con el objetivo de analizar posibles impactos sobre los procesos de transporte en la región. Posteriormente, se analizan las dinámicas de concentración de contaminantes en distintos puntos de la zona de estudio y de acuerdo con las escalas de tiempo involucradas. El período de análisis es enero 2018 - junio 2022. Este período permite capturar

rasgos meteorológicos característicos de la región, así como buscar posibles efectos de eventos climáticos como la influencia de los vientos del Sahara, el ENSO en sus fases cálida “El Niño” y fría “La Niña”.

Finalmente, se realiza un análisis de correlaciones y trayectorias con el objetivo de establecer relaciones entre las condiciones meteorológicas regionales, las concentraciones de contaminantes y la ocurrencia de eventos, tanto endógenos como exógenos, relacionados con las dinámicas de las concentraciones de contaminantes para la zona de estudio.

### 3.1 Análisis meteorológico

Los análisis meteorológicos se realizan sobre las variables de interés: temperatura ambiente (T), humedad relativa (HR), radiación solar (RAD), presión atmosférica (P), y velocidad (VV) y dirección del viento (DV). Para estas variables, se cuenta con registros de equipos Davis Vantage Pro II resolución horaria en los puntos de monitoreo en superficie (ZM3, ZM5, ZM6, ZM9 y ZM13). Las mediciones satelitales (P1 y P4) cuentan con registros cada 3 horas (1 h, 4 h, 7 h, 10 h, 13 h, 16 h, 19 h, 22 h) de las mismas variables anteriormente mencionadas. Adicionalmente, y para complementar los análisis, se involucran las variables de cobertura de nubes y altura de capa límite atmosférica, disponible en los puntos satelitales y proveniente del reanálisis ERA 5 de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-daily-era5-statistics?tab=app>).

La información de los sistemas de vigilancia de meteorología y calidad del aire como el SEVCA\_ZCC debe ser validada por el operador de las estaciones, siguiendo criterios como la verificación de mantenimiento, desempeño de la operación, entre otros. No obstante, se realizó un análisis preliminar de la calidad de la información para identificar datos faltantes o atípicos, verificar la uniformidad en las unidades de las variables para el período en todas las estaciones de monitoreo, así como la identificación de otras inconsistencias en las mediciones.

En la Tabla 3 se presentan las estaciones en superficie seleccionadas, las variables meteorológicas disponibles y el porcentaje de faltantes en el conjunto de mediciones de cada punto. Catalogando como faltantes a las 3 frecuencias más altas de datos no disponibles de forma continua en resolución horaria.

*Tabla 3. Mediciones meteorológicas-Estaciones de superficie*

Estación	Variable	Disponible%	Cantidad de faltantes*	Períodos de faltantes
ZM3	T	95.2	1003-355-335	
	P	94.0	1003-355-337	
	PC	95.3	1003-355-337	29/03/2020-10/05/2020,
	HR	94.0	1003-357-335	22/11/2020-07/12/2020,
	VV	94.7	1003-355-335	18/05/2022-31/05/2022
	DV	91.7	1003-355-335	
	RAD	94.5	1003-355-335	

ZM13	T	92.2	491-375-282	
	P	92.2	491-375-282	
	PC	92.3	491-371-273	20/01/2022-09/02/2022,
	HR	91.7	491-375-282	13/11/2021-29/2021,
	VV	93.1	491-371-273	17/08/2021-28/08/2021
	DV	93.1	491-371-273	
ZM5	T	96.4	239-226-150	
	P	96.4	240-226-150	
	PC	96.4	239-226-150	05/01/2018 -15/01/2018,
	HR	95.8	239-226-195	29/04/2021-08/05/2021,
	VV	96.4	239-226-150	10/05/2021-16/05/2021
	DV	96.4	239-226-150	
	RAD	95.1	239-226-193	
ZM9	T	99.2	69-35-19	
	P	98.9	69-51-35	
	PC	98.8	69-35-28	01/08/2018-30/08/2018,
	HR	99.1	69-35-19	11/06/2021-16/06/2021,
	VV	98.9	90-66-64	20/05/2019-23/05/2019
	DV	98.9	90-66-64	
	RAD	96.5	712-148-73	
ZM6	T	83.6	961- 744-419	
	P	83.4	961- 744- 419	
	PC	90	961- 419- 279	29/06/2018-07/08/2018,
	HR	85.4	961- 419- 279	09/06/2018-26/06/2018,
	VV	84.3	961- 419- 279	01/05/2022-31/05/2022
	DV	85.5	961- 419- 279	

\*Se denomina faltantes a las 3 frecuencias más altas de datos no disponibles de forma continua en frecuencia horaria

De igual manera, se presentan en la Figura 2 algunas de las gráficas utilizadas para realizar la inspección de las mediciones. Se verificó que los datos estuvieran en un rango posible de acuerdo con la naturaleza de cada variable y a las condiciones conocidas en la zona. Para facilitar la revisión mencionada, se procedió a realizar diagramas de cajas para el ciclo diurno en cada estación de monitoreo. Las gráficas resultantes fueron inspeccionadas para señalar como datos sospechosos aquellos valores que presentarán un comportamiento atípico, es decir por fuera de la tendencia del conjunto.

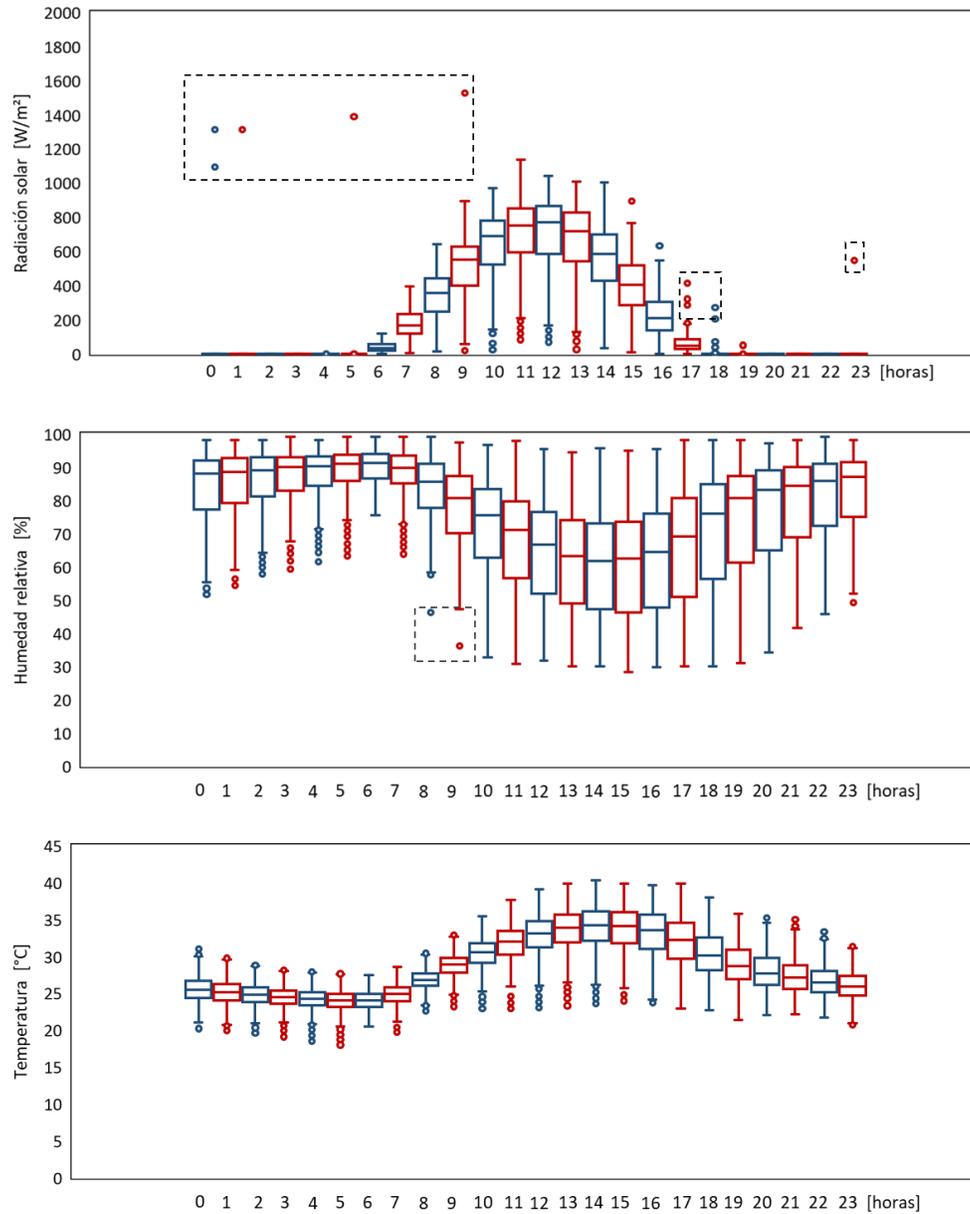


Figura 2. Diagramas de caja ciclo diario para variables meteorológicas-Estaciones de superficie

El criterio de revisión de datos sospechosos dependía de la naturaleza y comportamiento de cada variable, destacando que para temperatura, presión, humedad relativa y radiación solar, se revisaron los datos catalogados como atípicos, verificando que estos datos cumplieran con una prueba de tolerancia entre los límites máximos y mínimos definidos como el percentil 90 y percentil 10 en el conjunto de datos de cada horario (Araya, 2011). Además, se realizó una prueba de consistencia de los datos catalogados como atípicos, revisando gráficamente el comportamiento de estos con respecto a los datos vecinos en la evolución temporal de cada uno (IDEAM, 2018).

Con respecto a variables como precipitación, velocidad y dirección del viento, debido a la naturaleza y comportamiento de las mismas, no era posible catalogar como datos sospechosos a los datos atípicos registrados en los diagramas de caja, por lo cual, el tratamiento para estas variables consistió en verificar que las mediciones se encontraran dentro de los rangos conocidos en la zona y comparando los promedios y/o acumulados mensuales con los valores reportados por estaciones de superficie pertenecientes a sistemas de vigilancia de empresas mineras. La revisión y validación de datos sospechosos aumentó la confiabilidad de la información debido a que la totalidad de datos catalogados como sospechosos no superó el 2% en ninguna de las estaciones o variables.

Finalmente, la información se analizó en diferentes escalas temporales mediante la construcción de ciclos anuales y diarios. Para el análisis de la precipitación y dada su naturaleza de variable discreta, se obtiene el acumulado de los valores para cada escala de tiempo de interés, mientras que los ciclos de las variables restantes se calculan con base a la media aritmética en cada escala temporal. La dirección del viento se analiza con herramientas polares de análisis de datos.

### **3.1.1 Ciclo anual**

En las Figura 3 a la 10 se presenta el ciclo anual de las variables meteorológicas para cada uno de los puntos de monitoreo en superficie, así como para la información satelital. De igual manera, en la Tabla 5 se presenta el mapa de calor para el ciclo anual de las variables meteorológicas de interés con el objetivo de visualizar la variabilidad en las magnitudes de estas variables.

Debido a la ubicación de la región de estudio entre el trópico, la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) se encuentra bajo la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ZCIT es la región del globo terrestre donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte y los del hemisferio sur. Es una franja de bajas presiones que se mueve a lo largo del ecuador y está formada por aire cálido y húmedo (Quiroz & Hidalgo, 2016) como resultado de la mayor radiación promedio anual sobre la región. A lo largo del análisis, se realizarán menciones con respecto a la posición de la ZCIT y su posible influencia en la variabilidad del ciclo anual de la meteorología.

Para la temperatura, y de forma general para todos los puntos de monitoreo, se observa un marcado ciclo anual bimodal con valores máximos entre enero y abril, y menores reportes alrededor de los meses septiembre-noviembre. Aunque las estaciones de monitoreo en superficie exhiben entre ellas promedios mensuales similares, con valores entre los 27°C-30°C, las estaciones con mayores valores de la temperatura en promedio durante todo el año son ZM3 y ZM13, con valores entre 1°C y 2°C por encima de las demás estaciones. Esta diferencia es más evidente durante los meses más cálidos, y puede deberse a la ubicación de estas dos estaciones, que están más alejadas de las formaciones montañosas al este de la región de estudio. Por el contrario, la estación ZM5 exhibe en promedio las menores temperaturas para el período de registro. Valores mayores de la temperatura durante el primer semestre del año pueden estar asociados con la ubicación de la ZCIT un poco más al sur durante esos meses, lo que posibilita el mayor ingreso de radiación solar en superficie para la región de estudio.

Por otro lado, los datos de origen satelital exhiben valores de temperatura entre los 24°C-26°C en el ciclo anual, es decir, en promedio más bajos que los reportados en las estaciones de monitoreo en superficie. Lo anterior se evidencia debido a que por la naturaleza de medición desde satélite, no se captura el efecto del calentamiento desde la superficie (suelo) que sí se evidencia en las mediciones en superficie. Sin

embargo, los datos de información satelital muestran la misma tendencia del ciclo anual que los registros tomados en tierra. (Ver Figura 3).

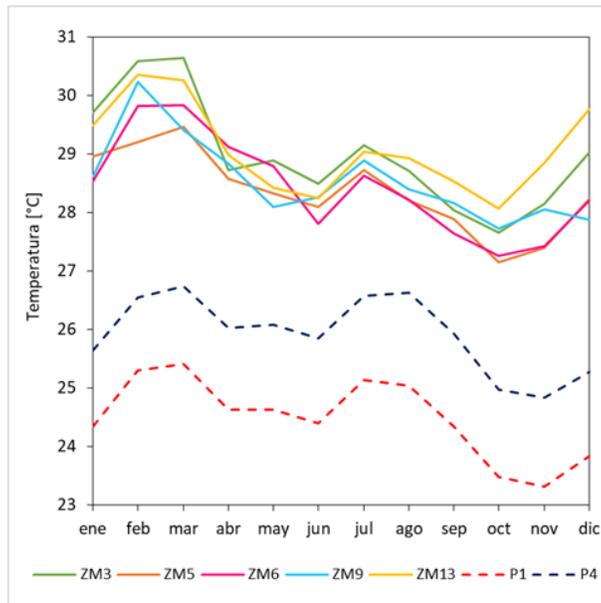


Figura 3. Ciclo anual de temperatura ambiente

Para el caso de la humedad relativa, el ciclo anual muestra un comportamiento contrario al de la temperatura del aire. Los mayores valores se encuentran entre los meses de abril y noviembre, con pico máximo alrededor del mes de octubre, mientras que valores menores se evidencian durante los primeros meses del año. Todos los puntos de monitoreo exhiben un comportamiento similar, sin embargo, la estación que en promedio muestra mayores valores de humedad relativa a lo largo del año es ZM6 mientras que ZM13 muestra los menores valores. Durante el trimestre septiembre-noviembre, típicamente la ZCIT está viajando hacia el sur en su proceso de migración desde la región al norte del país, donde se encuentra a mitad de año, lo que puede explicar las mayores cantidades de humedad sobre la región alrededor del mes de octubre, pues es el período donde se encuentra pasando sobre la región. Las estaciones de superficie muestran los valores de humedad relativa más bajos en comparación con la información satelital. Los datos en superficie exhiben valores mínimos de alrededor del 64% y máximos de hasta 82%. Mientras que los puntos satelitales muestran un reporte del 67% y el 90% de humedad mínima y máxima en la zona, respectivamente (Figura 4).

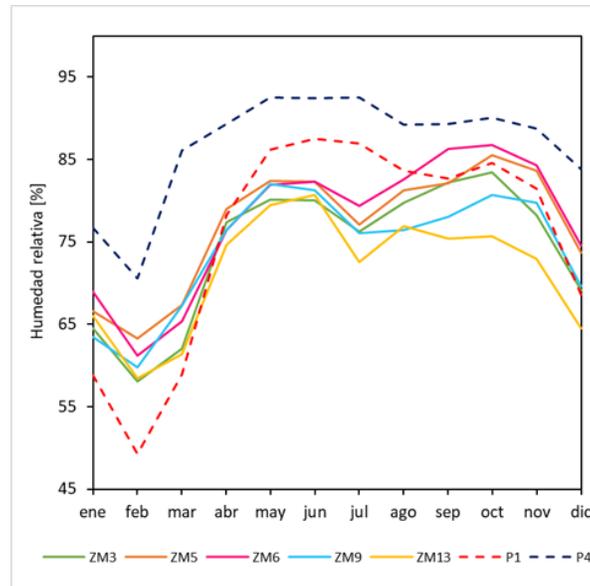


Figura 4. Ciclo anual de humedad relativa

Con respecto a la radiación solar (Figura 5), se evidencia un ciclo anual bimodal, tanto para la información tomada en superficie como para la información satelital, y a diferencia de las demás variables meteorológicas ya analizadas, presenta magnitudes similares para los dos tipos de información. El comportamiento de la radiación solar tiene relación con el ciclo anual de la temperatura, analizado anteriormente. Los valores máximos de radiación se reportan durante los meses febrero-marzo y julio-agosto, mientras que menores valores son evidentes alrededor de mayo y octubre. De manera similar a los análisis anteriores, este ciclo evidencia el paso de la ZCIT durante mayo y octubre, notando la limitación en la radiación solar incidente sobre la región. El rango de radiación promedio en la zona está entre los  $200 \text{ W/m}^2$  y los  $233 \text{ W/m}^2$  para todo el año.

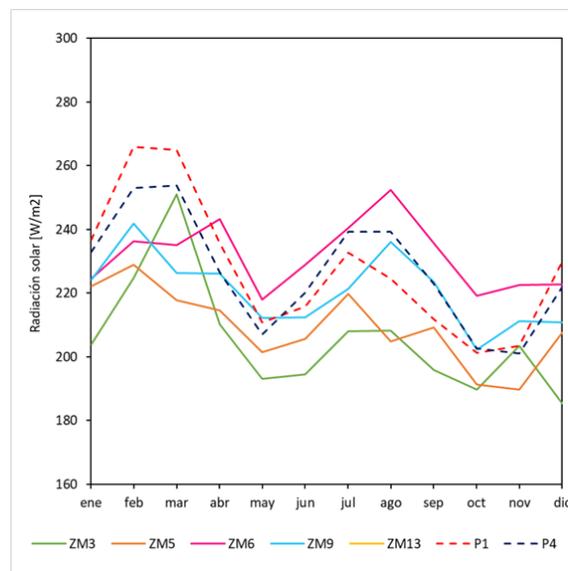


Figura 5. Ciclo anual de radiación solar

En la Figura 6 se muestra la magnitud de la velocidad del viento para los puntos de medición en la zona de estudio. La velocidad tiene un comportamiento variable a lo largo del año para todas las estaciones analizadas exhibiendo un ciclo anual bimodal en las estaciones de medición (ZM3, ZM6 y ZM13) ubicadas al norte de la región de estudio, y un ciclo más unimodal en las estaciones (ZM5 y ZM9) ubicadas al sur de la región de estudio, mucho más marcado para la estación ZM9. En general, las velocidades promedio en la región no superan los 3m/s; de manera particular, las mayores velocidades ocurren entre noviembre-marzo y las más bajas alrededor de mayo.

En comparación con otras estaciones de medición, se evidencian mayores valores para la estación ZM13 con mediciones en promedio 1 m/s mayores. Las estaciones ZM3 y ZM5, que se encuentran ubicadas al suroeste de la región de estudio exhiben las menores velocidades en promedio para todo el año. Comparando los ciclos entre la información medida en superficie y la información satelital, es posible decir que la información satelital captura en menor medida la alta variabilidad de la velocidad del viento en superficie.

Los cambios observados a lo largo del año en las velocidades de los vientos, están relacionados con la variabilidad en la posición de la ZCIT. Menores valores de velocidad del viento se notan a mitad de año y posteriormente en septiembre-octubre. La disminución de la velocidad registrada evidencia la limitación del transporte horizontal que genera el paso de la ZCIT sobre la región de estudio durante los meses en mención (Aristizábal et al., 2020). Por otro lado, entre enero y febrero cuando la ZCIT se encuentra al sur de la región, los vientos se intensifican, resaltando que para estos dos meses se aprecian las velocidades del viento más altas del ciclo anual en las estaciones de monitoreo (Ver tabla 5).

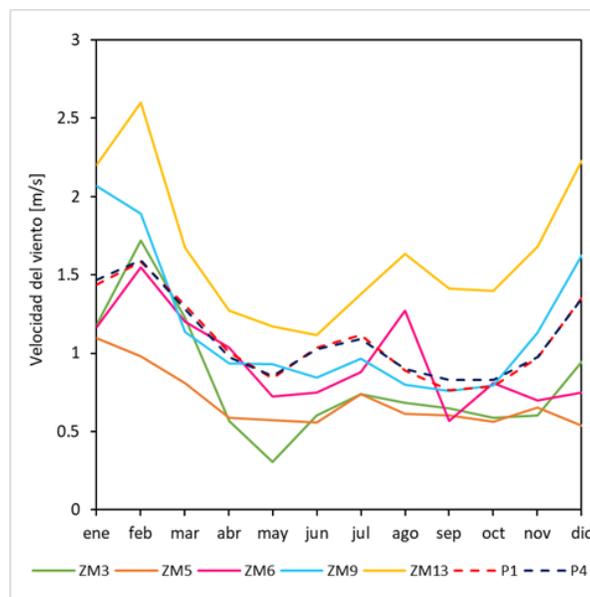


Figura 6. Ciclo anual de velocidad del viento

Por otro lado, debido a la naturaleza de la dirección del viento se construyeron gráficos polares para analizar la influencia de los vientos en la zona (Figura 7 y Figura 8). Las rosas del viento anuales muestran las principales contribuciones desde diferentes direcciones dependiendo de la estación analizada. Los puntos de monitoreo ZM9, ZM5, P1 y P2 registran las principales contribuciones desde las direcciones contenidas en el tercer cuadrante, es decir desde el suroeste. Estas estaciones presentan mayor cercanía

con la Serranía del Perijá, por lo cual este comportamiento puede estar marcado por la influencia de la dirección por el efecto térmico de los vientos catabáticos de esta serranía. Sin embargo, se resalta que para el caso particular de ZM5, la contribución principal del viento resulta presentarse en las direcciones opuestas a la ubicación de los polígonos mineros más cercanos.

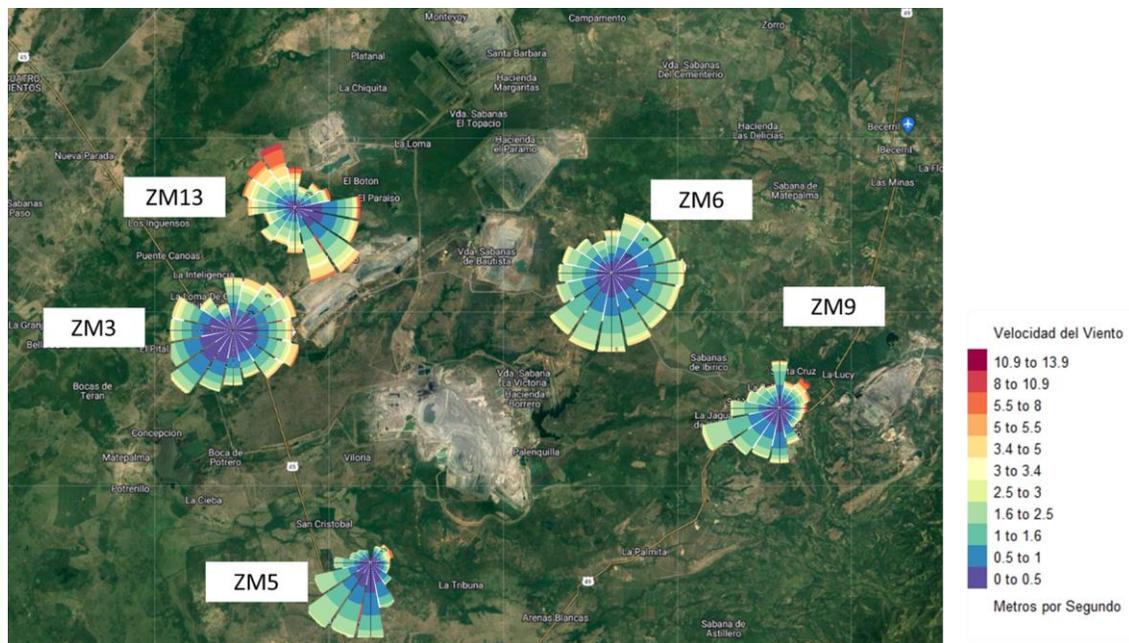


Figura 7. Rosas de viento anuales-Estaciones de superficie

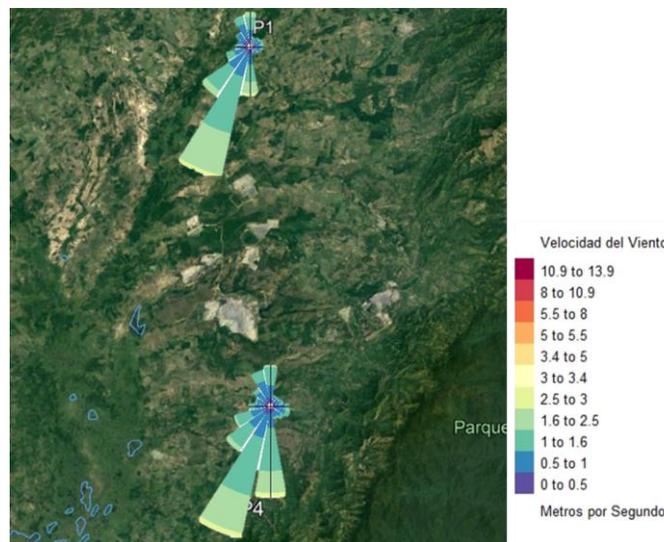


Figura 8. Rosas de viento anuales-Puntos satelitales

Las estaciones ZM3, ZM13 y ZM6, también presentan altas contribuciones desde el suroeste, sin embargo, se registran componentes de gran frecuencia desde el noreste. En particular, la estación ZM13 resalta la contribución más alta desde el noroeste y las mayores frecuencias para las velocidades del viento más altas.

De manera general, aunque para la zona se registran comportamientos variables entre las rosas del viento de las estaciones, se observa que las velocidades reportadas clasifican en su mayoría dentro de la categoría de “Calma”, con frecuencias de hasta 40% en velocidades inferiores a los 1.6 m/s (Navarro, 2019). Con respecto a la dirección, se resalta predominancia de las contribuciones del viento desde el noreste y el suroeste, resultados consistentes con características similares reportadas en estudios anteriores de la zona (M. Morales, 2018; Rojano, Manzano, et al., 2018).

Con respecto a la presión atmosférica (Figura 9), debido a las condiciones topográficas de la zona y a la naturaleza de esta variable en terrenos planos y de baja altitud, se observan variaciones de presión inferiores a 1 mmHg a lo largo del ciclo anual para todos los puntos de monitoreo. Los valores provenientes de información satelital exhiben en general valores mayores de presión a lo largo de todo el año. Sin embargo, se resaltan diferencias entre los valores de la presión para los distintos puntos de monitoreo en superficie. En particular, las estaciones ZM3 (48 msnm) y ZM13 (50 msnm), ubicadas al noroeste de la región, exhiben los valores promedio de la presión atmosférica más altos, mientras que las estaciones ZM5 (78 msnm) y ZM9 (126 msnm), ubicadas al sur, exhiben los valores más bajos de presión atmosférica durante todo el año, con diferencias de hasta 10 mmHg en comparación con las otras estaciones de medición. Dichas variaciones entre los puntos de monitoreo, se asocian a las diferentes altitudes reportadas entre ellas, notando las presiones más altas en los puntos más bajos de la zona, lo cual tiene sentido desde el punto de vista del comportamiento típico de la atmósfera.

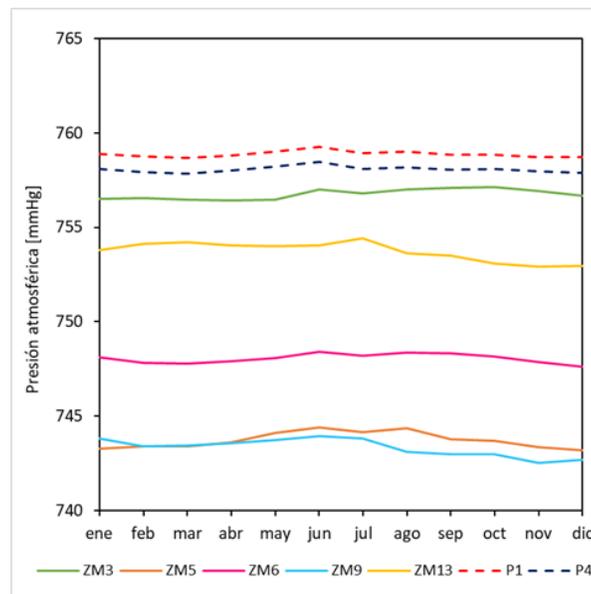


Figura 9. Ciclo anual de presión atmosférica

Por otra parte, la Figura 10 muestra el ciclo anual para la precipitación en la región. El régimen de la precipitación exhibe un ciclo bimodal para las estaciones analizadas con mayores valores de precipitación alrededor de los períodos abril-mayo y octubre-noviembre, y valores menores alrededor de los meses diciembre-enero-febrero. Alrededor de mitad de año también se evidencian valores bajos de precipitación, inferiores a 100 mm/mes y julio-agosto. Los períodos de mayores lluvias pueden alcanzar valores de hasta 800 mm/mes o 1000 mm/mes. Particularmente las estaciones ZM5 y ZM9 presentan los mayores picos máximos de precipitación, lo que puede estar asociado con su mayor cercanía a la zona montañosa en la región. Así mismo, las estaciones ZM5 y ZM9 exhiben en promedio los mayores valores de precipitación

durante todo el año. El comportamiento encontrado para la precipitación a lo largo del año es consistente con lo reportado para la humedad relativa en la región de estudio.

Los valores reportados para el ciclo anual de la precipitación desde los datos satelitales reportan valores en el promedio y con un ciclo anual similar a los valores reportados en las estaciones en superficie, destacando un mismo régimen de precipitación bimodal.

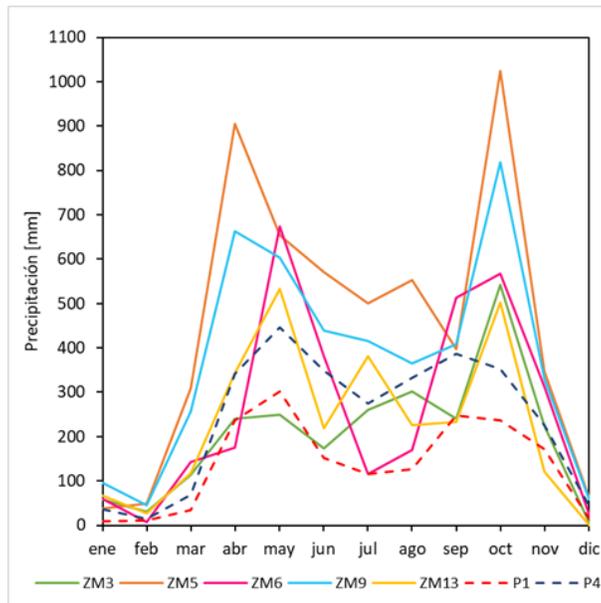


Figura 10. Ciclo anual de precipitación

El comportamiento de la nubosidad presentado en la Figura 11 muestra consistencia con el comportamiento de la precipitación y de la humedad relativa a lo largo del año, exhibiendo mayores valores de nubosidad para la región de estudio alrededor de los meses abril-mayo y septiembre-octubre. La información de cobertura de nubes sólo se encuentra disponible de manera satelital, por lo que solo aparecen dos ciclos anuales en la Figura 11.

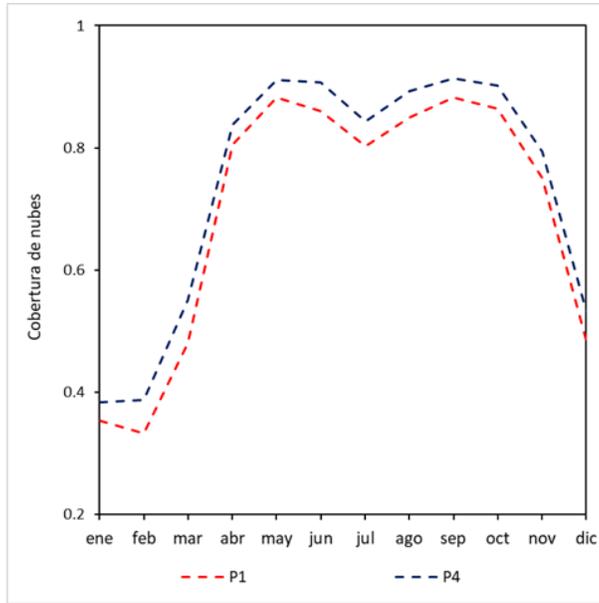


Figura 11. Ciclo anual de cobertura de nubes

Finalmente, la altura de capa límite muestra un ciclo anual bimodal, con valores más altos durante el primer trimestre del año y los más bajos durante septiembre-noviembre (Figura 12). El comportamiento de la capa límite a lo largo del año es consistente con el de otras variables como la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento. Valores más altos de radiación solar conducen a mayores temperaturas en superficie y esto puede conducir a mayores alturas de capa límite, más mezcla de capa turbulenta y en algunos casos mayores valores velocidades del viento. El comportamiento de las variables atmosféricas analizadas anteriormente, muestran mayor mezcla y posiblemente mayor turbulencia en la atmósfera durante el primer semestre del año, lo que contribuye con un mayor crecimiento de la capa límite en este período (Yan et al., 2022).

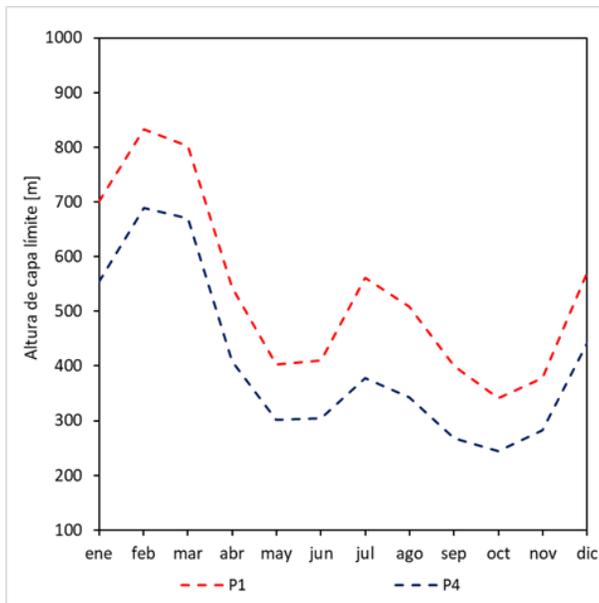


Figura 12. Ciclo anual de altura de capa límite

De las figuras anteriores, se observa que tanto las estaciones de superficie como los puntos satelitales muestran tendencias similares en el ciclo anual de las variables meteorológicas. Sin embargo, en las mediciones satelitales se aprecian valores más bajos de temperatura y valores más altos de humedad relativa y presión atmosférica, con respecto a las estaciones de superficie. Donde se nota la mayor diferencia en la variable de temperatura, con una discrepancia de hasta 12% en la escala anual, resultado previsible debido a los dos orígenes de información diferentes (superficie Vs. satelital) y a la naturaleza de la medición en cada uno.

En síntesis, el comportamiento en el ciclo anual de las variables meteorológicas para la región de estudio está significativamente influenciado con la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que afecta diferentes regiones del país en diferentes momentos del año.

El mapa de calor de la Tabla 4 presenta un resumen de la variación en las magnitudes a lo largo del ciclo anual para cada una de las variables meteorológicas analizadas. Durante los primeros meses del año, se presentan los valores más altos de temperatura, radiación solar y velocidad del viento, lo cual a su vez genera mayor turbulencia en la atmósfera obteniendo mayores alturas de capa límite. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento de la meteorología en estos meses está relacionado con la migración de la ZCIT sobre la región de estudio, en particular más al sur durante el período en mención. De igual manera, durante diciembre-febrero la ZCIT aún se encuentra al sur del país, por lo tanto su influencia es menor en la región de estudio, evidenciando los valores más bajos de la precipitación y la humedad relativa.

Durante los meses septiembre-noviembre se aprecian menores temperaturas y mayor precipitación y humedad relativa. Durante estos meses la ZCIT está en su proceso de migración desde la región al norte del país, donde se encuentra a mitad de año, permitiendo así que aire húmedo llegue a la zona y ocasione mayor cantidad de eventos de precipitación con respecto a otros períodos del año. Se resalta que la época lluviosa del segundo semestre se caracteriza por un régimen de precipitaciones abundantes, debido a que en estos meses suelen presentarse otros procesos generadores de precipitación además de la ZCIT, como los ciclones tropicales y ondas del este (Guzmán et al., 2014).

\*Variables perteneciente al conjunto de datos de puntos satelitales

*Tabla 4. Mapa de calor- Ciclo anual promedio de variables meteorológicas para las estaciones de superficie*

	Temperatura	Humedad	Radiación	Presión	Velocidad	Precipitación	Cob. Nubes *	ACL *
ene	29.06	65.91	218.68	749.10	1.54	63.81	0.37	627.86
feb	30.03	60.15	232.94	749.05	1.75	32.01	0.36	761.32
mar	29.92	64.71	232.58	749.05	1.21	188.34	0.52	736.64
abr	28.85	76.78	223.57	749.11	0.88	465.51	0.82	476.26
may	28.50	81.17	206.20	749.28	0.74	542.89	0.90	352.48
jun	28.18	81.32	210.40	749.56	0.77	356.57	0.88	357.03
jul	28.89	76.26	222.40	749.56	0.94	334.49	0.82	469.56
ago	28.49	79.37	225.36	749.19	1.00	323.38	0.87	425.51
sep	28.05	80.81	216.08	749.14	0.80	358.51	0.90	333.65
oct	27.57	82.40	200.59	749.02	0.83	690.61	0.88	292.96
nov	27.97	79.78	206.73	748.72	0.95	266.86	0.77	330.34
dic	28.62	70.31	206.69	748.63	1.22	29.50	0.51	506.83

Por otro lado, se notan diferencias en los ciclos de las variables meteorológicas. Estaciones cercanas a la Serranía del Perijá como ZM5 y ZM9 registran mayores precipitaciones, temperaturas más bajas y direcciones del viento con sus principales contribuciones desde el suroeste. Por otro lado, estaciones como

ZM3 y ZM13, las cuales están alejadas de este cuerpo montañoso, exhiben las temperaturas más altas de la zona y muestran contribuciones del viento desde otras direcciones como el sureste y noroeste.

A pesar de las diferencias de los ciclos anuales entre estaciones, con respecto a la variabilidad espacial de las condiciones meteorológicas, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los reportes entre los sitios de monitoreo (ANOVA,  $p > 0.05$ ). Lo anterior sugiere que las condiciones meteorológicas no presentan diferencias importantes entre las estaciones de monitoreo, permitiendo suponer condiciones meteorológicas similares para la región. La caracterización meteorológica y la homogeneidad espacial de la misma, es coherente con resultados arrojados por un estudio similar realizado en el norte de Colombia durante 2012-2016 en una de las minas a cielo abierto más grandes del departamento de la Guajira (Rojano, Manzano, et al., 2018).

Por último, para conocer la similitud e interacciones entre variables meteorológicas, en la Figura 13 y Figura 14 se presentan los resultados del análisis de componentes principales (PCA). Las figuras muestran la reducción de dimensión realizada con el análisis multivariado, explicando el comportamiento de cada una de las variables con respecto al grupo total. Al mismo tiempo, los resultados muestran la contribución de cada variable a la variabilidad total de las condiciones meteorológicas de la región de estudio.

En el PCA se utilizaron criterios de corte que permitieron tomar aquellos factores (2 dimensiones) que explicaron el 80% de la varianza del conjunto de datos, excluyendo a variables como la presión atmosférica y dirección del viento, debido a la naturaleza de las mismas y la poca correlación encontrada para ellas y las variables meteorológicas restantes.

Sabiendo que en los resultados del PCA, a menor distancia las variables refieren mayor similitud, se nota que la cobertura de nubes, humedad relativa y precipitación, muestran una alta relación. Resultados consistentes con el comportamiento de estas variables en los ciclos anuales analizados anteriormente. Así mismo, se resalta una relación inversa entre las variables de cobertura de nubes, humedad relativa y precipitación con respecto al comportamiento de velocidad del viento en ambos conjuntos de datos. Lo cual se traduce en que durante los días con eventos de precipitaciones, se supone una disminución en la velocidad del viento para la zona de estudio, reduciendo el transporte horizontal de los vientos.

Por otra parte, la radiación solar no muestra una similitud importante con otras variables, sin embargo, tiene un comportamiento en la misma dirección que la temperatura, velocidad del viento y altura de capa límite. Destacando que la radiación solar y la temperatura representan las contribuciones más altas a la variabilidad de ambos conjuntos de datos meteorológicos. Estos resultados permiten confirmar la alta relación notada anteriormente entre las variables de temperatura, velocidad del viento y radiación en la altura de la capa límite atmosférica, destacando que los principales cambios se modulan por la temperatura y radiación solar en la zona.

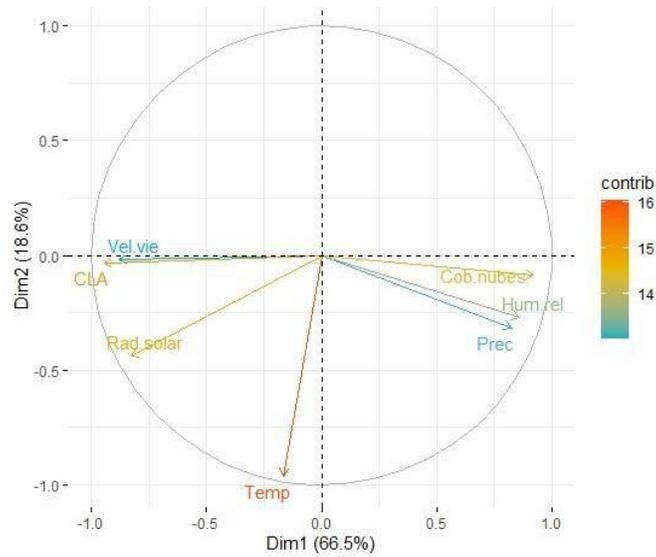


Figura 13. Análisis de componentes principales -PCA Puntos Satelitales

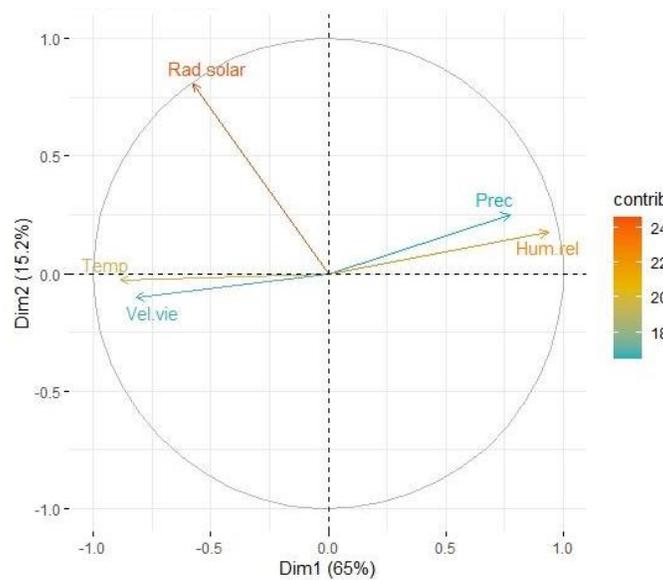


Figura 14. Análisis de componentes principales -PCA Estaciones de Superficie

Posteriormente, al analizar las características meteorológicas del ciclo anual (Figura 2 a la 12) y la distribución de los meses en los gráficos de asociaciones del PCA (Figura 15), se identificaron los períodos de características meteorológicas similares. En este sentido, el análisis multivariado del PCA se utilizó no solo como una herramienta de reducción de dimensión para facilitar el análisis, sino también como una alternativa para identificar asociaciones entre grupos de mediciones.

En la Figura 15 se observa la agrupación espacial de los meses de medición, notando patrones de ubicación en los resultados. Esta distribución se encuentra relacionada con la contribución de cada mes analizado a las dimensiones del PCA. Dependiendo del cuadrante en el que se encuentren ubicados, se asocian ciertas características meteorológicas al grupo. Para el primer cuadrante se asocia una ausencia de precipitaciones

y humedad relativa baja, en el tercero se destacan bajas velocidades del viento, para el cuarto cuadrante se asocia una baja temperatura y una baja radiación solar, mientras que en el segundo cuadrante se ubican las mediciones que presentan características especiales por lo que no muestran fuertes pesos en ninguno de los cuadrantes restantes.

Seguidamente, se realizó la división de los datos agrupándolos por la similitud encontrada para las mediciones. Los resultados de la clasificación corresponden a 4 períodos agrupados de la siguiente manera: diciembre-febrero, marzo-mayo, junio-agosto, septiembre-noviembre, identificados como DEF, MAM, JJA y SON respectivamente según las iniciales de cada mes dentro del trimestre.

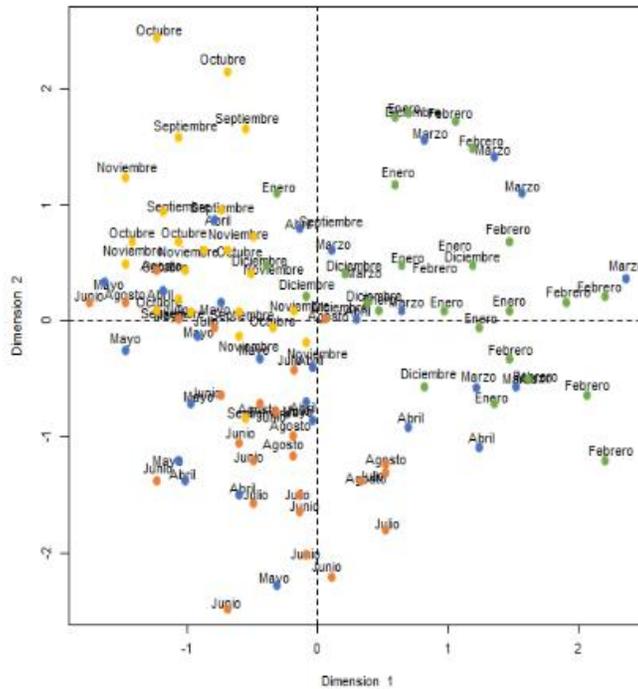


Figura 15. Asociación del período de estudio-PCA ciclo anual

De los resultados obtenidos con el análisis de componentes principales (PCA), podemos confirmar la consistencia de las relaciones notadas entre los ciclos anuales de las variables meteorológicas. Similitudes entre cobertura de nubes, precipitación y humedad relativa son apreciadas con un comportamiento en la misma dirección con respecto al conjunto de datos total. Por otro lado, con un comportamiento en relación inversa con respecto a las variables anteriores, tenemos a la velocidad del viento, altura de capa límite, radiación solar y temperatura, las cuales presentan un menor grado de similitud entre ellas. Sin embargo, la temperatura y la radiación solar corresponden a las variables de mayor impacto en la variabilidad del conjunto de datos meteorológicos. Finalmente, se destaca que la clasificación de los meses con respecto a las asociaciones en las características meteorológicas, resultó ser consistente con las estaciones climatológicas identificadas en Colombia (Montoya & Mesa, 2015).

### 3.1.2 Ciclo diurno

En las Figura 16 a la Figura 28 se presenta la evolución de las variables meteorológicas durante el ciclo diurno para las estaciones de superficie y los puntos satelitales. De igual manera, en la Tabla 5 se presenta el mapa de calor para el ciclo diurno de las variables meteorológicas de interés. Para las estaciones de superficie la resolución de la información es horaria, mientras que para los puntos satelitales se cuenta con mediciones cada 3 horas (1 h, 4 h, 7 h, 10 h, 13 h, 16 h, 19 h, 22 h).

Se observa que la temperatura exhibe un ciclo unimodal con los valores más altos a las 14:00 h y los más bajos entre las 05:00 h-06:00 h del día, como puede verse en la Figura 16. Los valores máximos se registran en las estaciones ZM3 y ZM13, con picos alrededor de los 34°C, mientras que estaciones como ZM6 y ZM5 alcanzan mínimas de 24°C. El rango de variación de la temperatura en su ciclo diurno está alrededor de los 10°C. Las variaciones a lo largo del día tienden a ser pronunciadas debido a que no existen cuerpos de agua cercanos en la zona que controlen el almacenamiento y liberación gradual del calor.

Por otro lado, los puntos satelitales muestran sus valores máximos de temperaturas a las 13:00 h y los mínimos a las 04:00 h. El desfase aparente entre los máximos y mínimos de los dos orígenes de información puede deberse a la resolución de los datos disponibles en ambos conjuntos de datos, mientras que en las mediciones de superficie se reporta de manera horaria, los puntos satelitales lo realizan cada 3 horas. Los puntos satelitales alcanzan máximos de 31°C, notando diferencias con respecto a las magnitudes de los reportes en superficie. Estas diferencias fueron analizadas anteriormente y se deben a la naturaleza de la medición de ambos conjuntos de datos.

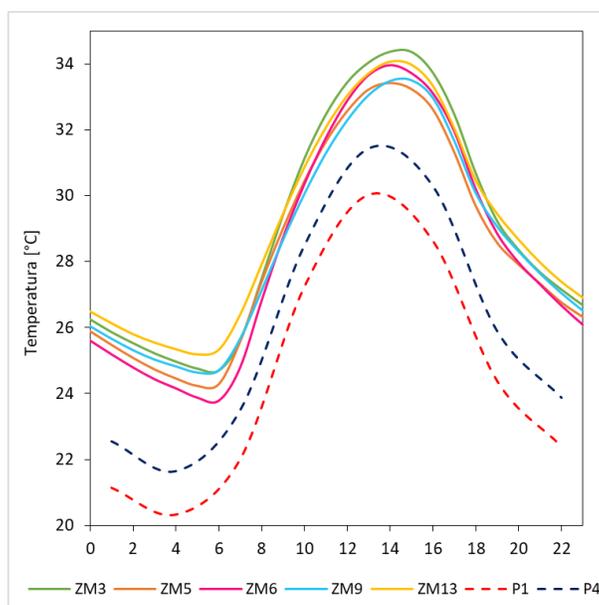


Figura 16. Ciclo diurno de temperatura ambiente

El ciclo diurno de la humedad relativa (Figura 17) muestra un comportamiento inverso al de temperatura ambiente. Sin embargo, la humedad es una medida de la capacidad del aire para almacenar agua en forma de vapor, lo cual es directamente proporcional a la temperatura. A temperaturas más altas, las moléculas del agua tienen más energía cinética, por lo tanto, tienen más presión de saturación y son más propensas

a evaporarse (Hernández et al., 2020). Particularmente, la humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire sobre la cantidad máxima que podría contener a una temperatura dada (Galloza & Ponce, 2022).

En este escenario, si se mantiene constante la cantidad de vapor de agua, con el aumento de temperatura se observará una disminución de la humedad relativa, debido a que la capacidad para almacenar agua (divisor de la humedad relativa) a temperaturas más altas, aumenta. Lo anterior explica el efecto inverso que se aprecia en el ciclo diurno de la humedad relativa para la zona. En las estaciones de superficie, los valores de humedad alcanzan máximos de 87% a las 06:00 h, debido a que la atmósfera está a una menor temperatura y por lo tanto la saturación con vapor de agua se alcanza más rápido. Cuando la atmósfera se empieza a calentar, comienza el punto de inflexión de la humedad relativa hasta alcanzar mínimos de 58% a las 14:00 h.

El ciclo diurno de la humedad relativa muestra en promedio los valores más bajos a lo largo del día en la estación ZM13, lo cual se asocia con que esta estación exhibe los mayores valores de temperatura en la zona y se encuentra ubicada a mayor lejanía del cuerpo montañoso del Perijá. Estaciones como ZM6 y ZM5, con una mayor cercanía a la serranía del Perijá, reportan por el contrario los valores más altos de humedad relativa. De igual forma, se observa que entre las estaciones de superficie y el punto satelital P1 se reportan valores muy similares de la humedad relativa a lo largo del día, mientras que P4 exhibe valores por encima del promedio, lo cual puede estar relacionado a la cercanía de este punto con los cuerpos de agua más próximas en la zona.

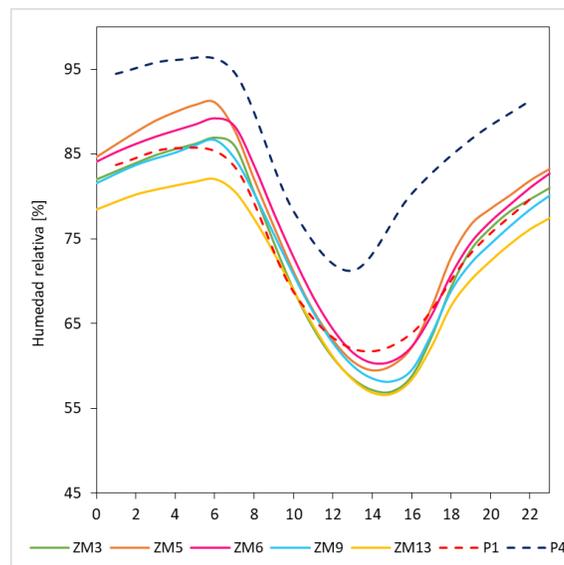


Figura 17. Ciclo diurno de humedad relativa

Con respecto a la radiación solar (Figura 18) se observan los mayores valores a las 11:00 h en las estaciones de superficie, notando un ciclo unimodal similar al de la temperatura, pero con un desfase hacia atrás (más temprano). Esto se debe a que los incrementos en la temperatura se dan como resultados de los aumentos en la radiación solar. Se resalta que el pico de máxima temperatura ambiente (14:00 h) ocurre 3 horas después que el máximo de radiación registrado (11:00 h), retraso que ha sido reportado anteriormente en otros estudios en la zona (L. Morales, 2012).

Se aprecia en la Figura 18 que la estación ZM6 exhibe en promedio los valores más altos de radiación solar en la zona, lo cual podría deberse a la ubicación de este punto de monitoreo. La estación ZM6, a diferencia de las estaciones de monitoreo restantes, se encuentra ubicada en un entorno rural con pocas estructuras urbanas a su alrededor. Este entorno con vegetación de baja altitud (matorrales, césped) tiende a recibir mayor radiación con respecto a áreas con estructuras y superficies reflectantes (concreto) que puede limitar la radiación solar que incide en la zona.

Por otro lado, en los puntos de medición satelital se observa que los valores más altos de radiación se registran a las 13:00 h, notando que no existe el retraso con respecto a la temperatura, ya que muestran sus máximos a la misma hora.

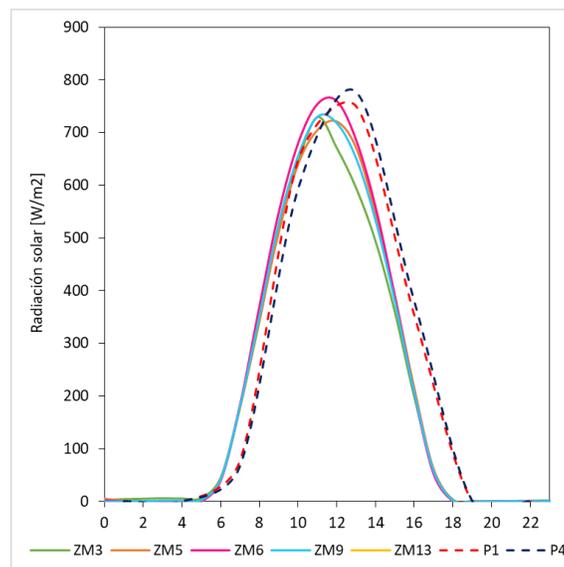


Figura 18. Ciclo diario de radiación solar

Seguidamente, en la Figura 19 se muestra la magnitud de la velocidad del viento durante el ciclo diario, notando que en la zona se registran velocidades que se catalogan en una categoría de “Calma” (inferiores a 1.6 m/s). Esta variable muestra una mayor intensidad de la velocidad del viento en las horas con presencia de luz solar. Esta afinidad de mayores valores de velocidad durante el día, posiblemente está relacionada con efectos generados por la ZCIT, que ha mostrado tener variabilidad en su intensidad dentro de una escala diaria (Barreiro et al., 2021). De igual manera, el efecto local generado por la variación de temperatura en este horario influye en la evolución de la velocidad, al igual que una capa límite más desarrollada que genere mezcla turbulenta en las horas de radiación solar puede llegar a aumentar las velocidades.

Los perfiles diarios para cada estación de monitoreo muestran tendencias particulares que no permiten establecer una hora de máxima velocidad del viento para la zona en general, observando un rango entre las 13:00h y 15:00 h. La estación ZM13, ubicada más al norte y con una mayor lejanía a la Serranía del Perijá, muestra las velocidades más altas en la zona y a su vez las menores variaciones a lo largo del día. Por otra parte, la estación ZM5, ubicada más al sur y con mayor proximidad a la Serranía del Perijá, muestra las velocidades más bajas. Este comportamiento diferenciado está relacionado a las condiciones de microlocalización de cada punto de monitoreo.

Con respecto a la dirección del viento, se presentan los gráficos polares discriminados por horario (diurno y nocturno) para las estaciones (Figura 20 a Figura 24). En las rosas de los vientos se nota que durante el horario nocturno existen cambios de las direcciones predominantes en los puntos de monitoreo. En la noche, y debido a la ausencia de la radiación solar, las condiciones del viento entran en condiciones de calma y dependen fundamentalmente de las condiciones sinópticas, especialmente de la posición de la ZCIT (Quiroz & Hidalgo, 2016). La dirección resultante durante estas horas o se ve afectada en menor medida de las fuerzas asociadas a los efectos térmicos que se intensifican en las horas con presencia de radiación solar (Barrera et al., 2019).

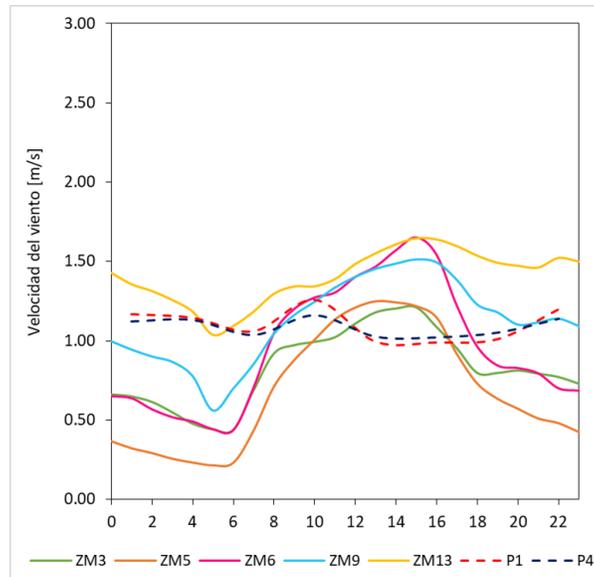


Figura 19. Ciclo diurno de velocidad del viento

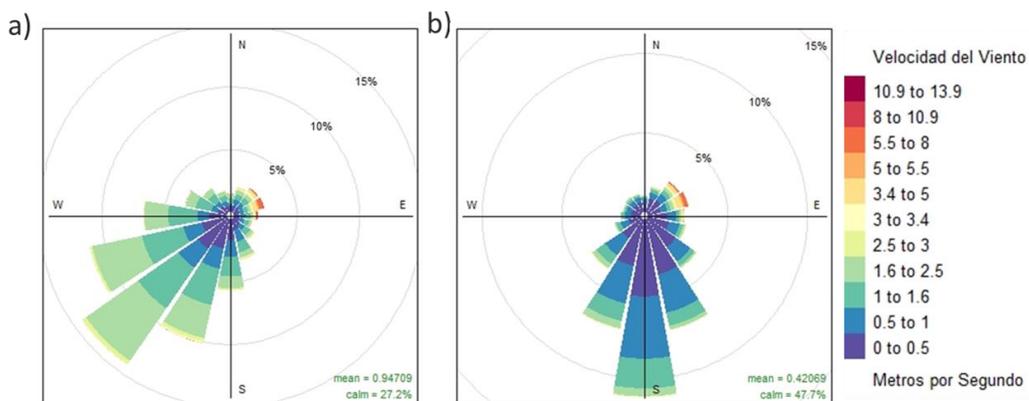


Figura 20. Rosas de viento horarias -Estación ZM5 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno

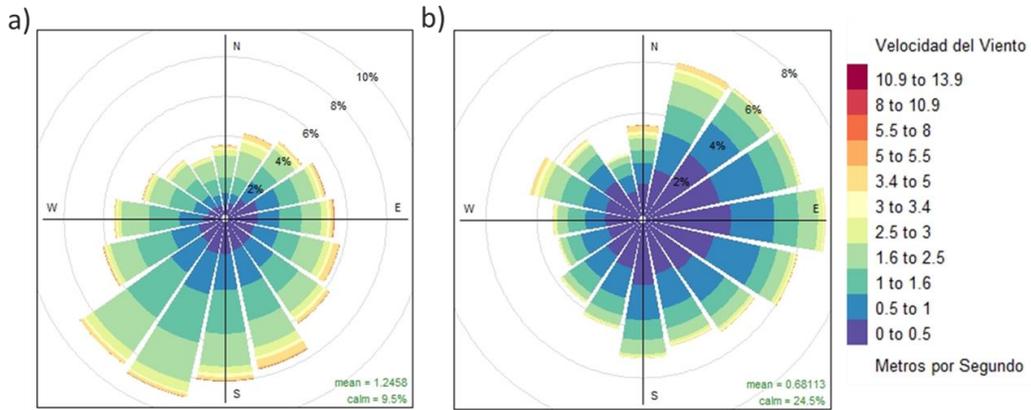


Figura 21. Rosas de viento horarias -Estación ZM6 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno

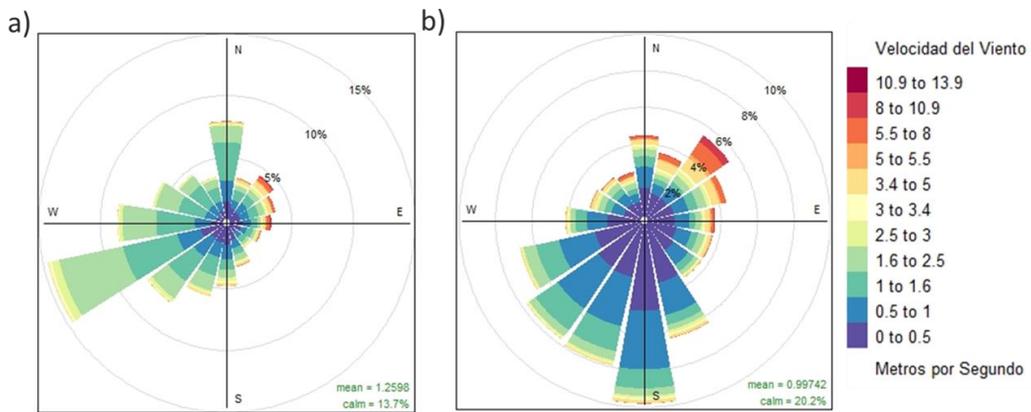


Figura 22. Rosas de viento horarias -Estación ZM9 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno

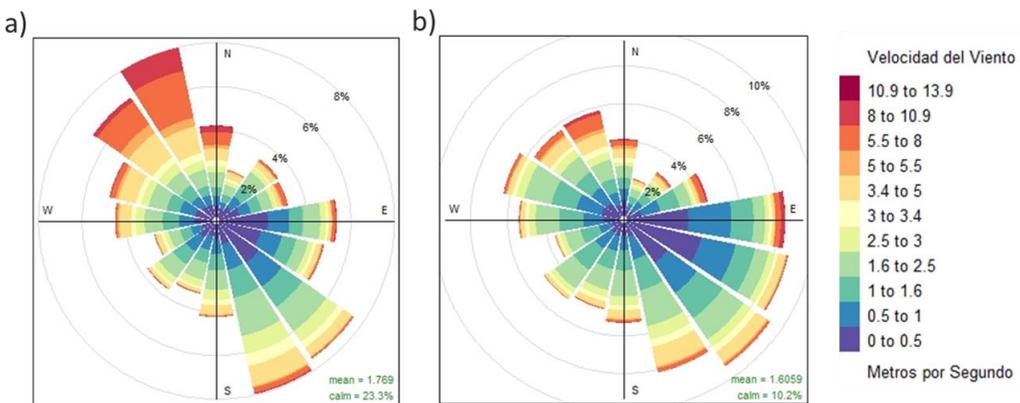
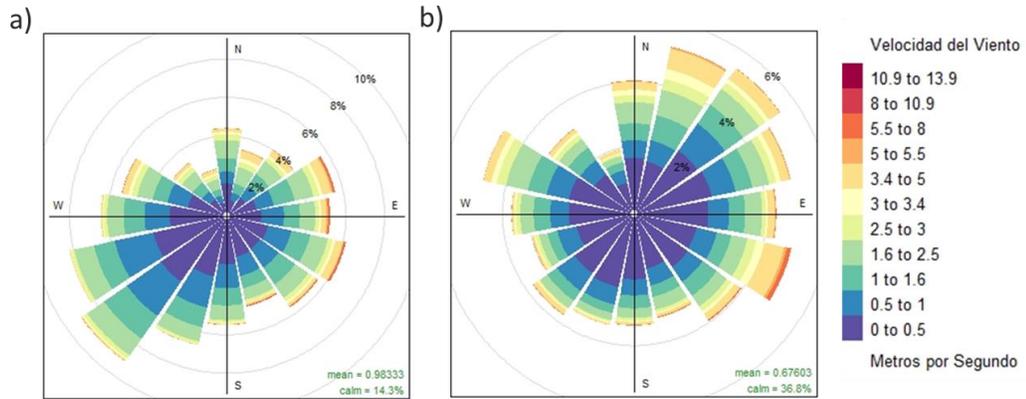
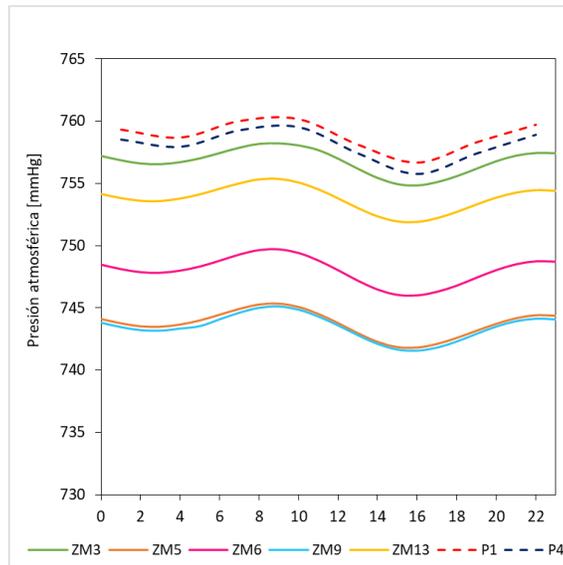


Figura 23. Rosas de viento horarias -Estación ZM13 a) Rosa de viento período diurno b) Rosa de viento período nocturno



En el ciclo diurno de presión atmosférica (Figura 25), se observa un perfil bimodal con variaciones inferiores a 5 mmHg en la evolución diaria de esta variable. Los valores más altos de presión se presentan entre las 09:00 h-10:00 h y posteriormente entre las 22:00 - 23:00 h, mientras que los valores más bajos se observan a las 16:00 h para las estaciones de superficie. En relación con las mediciones de los puntos satelitales, se destaca que se presentan valores alrededor de 10 mmHg más altos con respecto a las estaciones de superficie. Los mayores valores ocurren entre las 07:00h y 10:00 h, mientras que los valores más bajos se presentan de igual manera a las 16:00 h.



En cuanto a la variable de precipitación, en la Figura 26 se aprecia un ciclo bimodal a lo largo del ciclo diurno. Las horas de mayor precipitación acumulada corresponden al período entre las 00:00 h- 02:00 h y las 17:00 h – 23:00 h. Notando que la mayor cantidad de precipitación se da durante la noche, debido a que por el enfriamiento nocturno, se favorecen las condiciones para la formación de núcleos de condensación en las nubes y posterior precipitación.

Entre las estaciones de superficie se aprecia que las estaciones ZM9 y ZM5, próximas a la Serranía del Perijá, muestran los acumulados de lluvias más altos. Lo anterior se asocia a que estas estaciones se encuentran del lado Barlovento de la montaña (el lado de donde viene el viento predominante), permitiendo que el aire húmedo que se mueve hacia la montaña ascienda y posteriormente se precipite. Con relación a los valores típicamente menores observados en las estaciones ZM13 y ZM3, se resalta que estas estaciones son los puntos más lejanos al cuerpo montañoso en mención.

En el mismo sentido, los puntos satelitales muestran un perfil bimodal con sus picos máximos al inicio y al final del día, pero con mayores registros con respecto a las estaciones de superficie y una menor variación a lo largo del día. Entre las 07:00 h y 12:00 h, las estaciones de superficie muestran precipitaciones escasas, mientras que los puntos satelitales reportan valores que alcanzan los 250 mm (acumulado horario durante el período de estudio). Por otra parte, se observa que la precipitación es consistente con el ciclo de la variable de cobertura de nubes (Figura 27), que se relaciona de manera directa con esta variable. Registrando los picos máximos en los períodos de mayor cantidad de lluvias, durante las primeras y últimas horas del día.

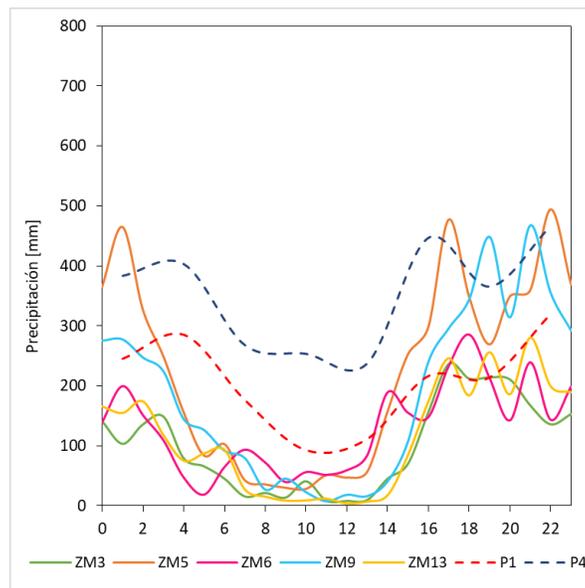


Figura 26. Ciclo diario de precipitación

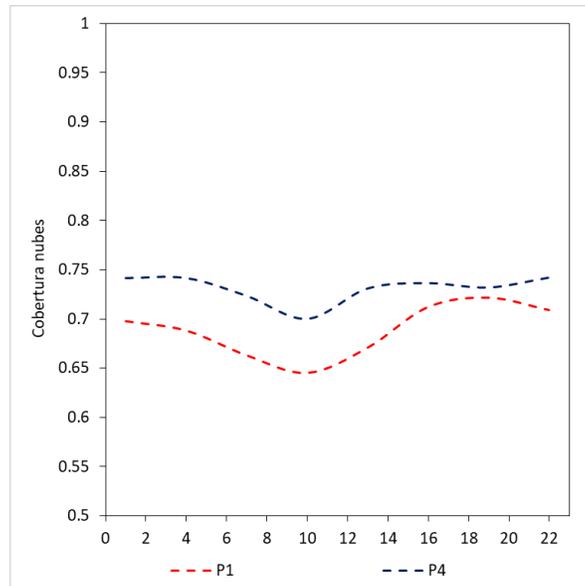


Figura 27. Ciclo diario de cobertura de nubes

Con relación a la variable de altura de capa límite, se nota en la Figura 28 un ciclo unimodal con una tendencia similar a la mostrada por los ciclos diarios de la radiación solar y la temperatura ambiente. Lo cual es consistente con los resultados esperados debido a la influencia de estas variables en la estructura termodinámica y la turbulencia de la atmósfera, fenómenos responsables en gran medida del crecimiento de la altura de la capa límite en la escala diaria (Feng et al., 2022). Los mayores valores de capa límite se presentaron a las 13:00 h y los mínimos a las 04:00 h. Se aprecia que los estos máximos y mínimos son consistentes con el horario de registro de los valores más altos y bajos de la temperatura ambiente y radiación solar en el conjunto de datos satelitales.

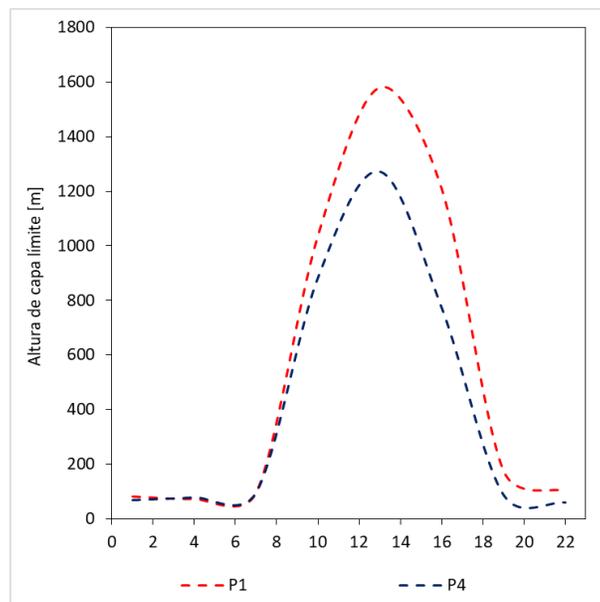


Figura 28. Ciclo diario de altura de capa límite

Por otro lado, debido a que la altura de capa límite mostró una de las contribuciones más altas a la variabilidad del conjunto total de datos meteorológicos (Ver resultados del PCA sección 3.1.1), y dada la importancia del rol de esta variable en la dispersión o acumulación de los contaminantes, se presenta en la Figura 29 un análisis del ciclo diurno discriminado por trimestre hidrológico.

Se aprecia que el trimestre diciembre-febrero (DEF), corresponden a los meses con alturas de capa límite atmosférica que alcanzan valores máximos de 1,900 m durante las 13:00 h. En este sentido, se presume que durante estos meses en mención, las condiciones meteorológicas como temperatura, radiación solar y velocidad del viento, alcanzan los valores óptimos para ocasionar mayor turbulencia en la atmósfera, permitiendo como consecuencia un mayor crecimiento de la capa límite.

Un escenario opuesto se presenta para el trimestre septiembre-noviembre (SON), período en el cual se registran los valores más bajos de la variable, notando valores máximos a las 13:00 h con reportes alrededor de los 900 m. Las alturas máximas alcanzadas por la capa límite entre los trimestres del año alcanzan diferencias significativas de hasta 1000 m, con los reportes más altos durante el trimestre DEF y los más bajos en SON. Estas variaciones están relacionadas con los cambios en la turbulencia de la atmósfera, lo cual incide de manera directa en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, ya que a mayor altura de capa límite se genera una mayor mezcla vertical que genera una mayor dispersión del material particulado.

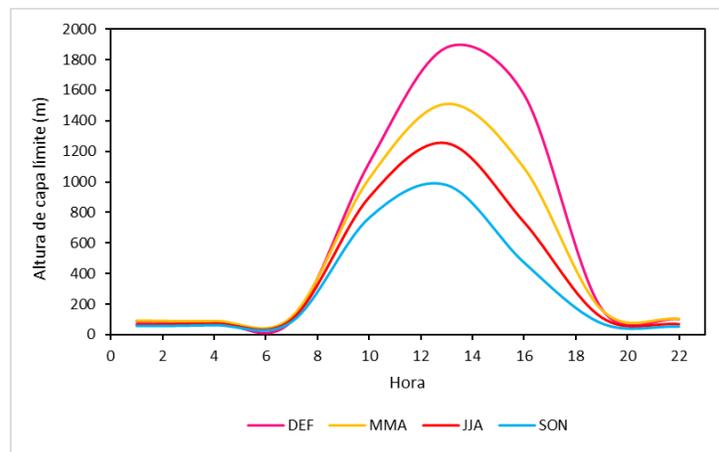


Figura 29. Ciclo diurno de altura de capa límite por trimestre hidrológico

El mapa de calor de la Tabla 5 presenta un resumen de la variación en las magnitudes a lo largo del ciclo diurno para la meteorología de las estaciones en superficie. Durante las 11:00 h se registra la mayor incidencia de radiación, y luego de 3 horas, se aprecia el máximo de temperatura. En los vientos se aprecian velocidades más bajas durante la noche, lo cual posiblemente está relacionado con la variabilidad de la intensidad de la ZCIT en la escala diaria (Barreiro et al., 2021). Con respecto a las diferencias en las direcciones del viento, estas se asocian a la variabilidad del efecto térmico durante las horas con ausencia o presencia de luz solar. De igual manera, el acumulado de lluvias más alto se registra durante las primeras y últimas horas del día, lo cual se relaciona con la disminución de la temperatura en este horario, lo que facilita que se inicien las precipitaciones.

Tabla 5. Mapa de calor- Ciclo diario de variables meteorológicas-Estaciones de superficie

	Temperatura	Humedad	Radiación	Presión	Velocidad	Precipitación
0	26.05	82.17	2.44	749.55	0.82	217.38
1	25.66	83.30	1.18	749.20	0.78	239.99
2	25.30	84.36	1.27	748.96	0.74	206.94
3	24.99	85.25	1.80	748.92	0.69	170.04
4	24.75	85.97	1.63	749.10	0.63	100.28
5	24.54	86.67	2.88	749.41	0.54	76.31
6	24.56	87.19	42.66	749.88	0.58	79.59
7	25.60	85.44	181.58	750.35	0.77	51.67
8	27.34	80.72	353.16	750.70	1.00	34.25
9	29.05	75.55	527.64	750.75	1.11	27.42
10	30.57	70.49	655.68	750.50	1.17	31.34
11	31.84	66.02	730.00	749.96	1.24	26.13
12	32.84	62.40	717.39	749.23	1.32	27.34
13	33.54	59.80	650.52	748.42	1.38	34.71
14	33.86	58.45	533.21	747.72	1.42	89.98
15	33.76	58.49	379.55	747.28	1.45	133.93
16	33.15	60.24	206.38	747.22	1.38	203.13
17	31.89	64.44	58.11	747.50	1.21	297.67
18	30.23	69.76	2.09	747.99	1.05	274.78
19	29.04	73.42	0.03	748.60	0.99	280.18
20	28.25	75.72	0.01	749.19	0.96	240.46
21	27.59	77.67	0.29	749.63	0.94	302.84
22	27.00	79.42	0.26	749.84	0.92	265.54
23	26.50	80.90	0.55	749.80	0.89	240.55

### 3.1.3 Análisis interanual

Adicionalmente a las escalas de mayor interés para la investigación (anual y diaria), se exploraron posibles efectos de fenómenos climáticos que actúan en la escala interanual como el ENSO. Para esto, se realizó una comparación de los valores promedio anuales de cada variable para cada año dentro del período de estudio. En las Figura 31 a la Figura 35 se presenta la evolución anual de las variables meteorológicas, donde se muestran tendencias consistentes en los ciclos anuales de los años involucrados. Sin embargo, se aprecian diferencias en las mediciones de algunas variables meteorológicas dependiendo del año analizado.

En este escenario, para lograr una explicación de la variabilidad interanual de la meteorología en la región con respecto al ENSO, es pertinente presentar al indicador macroclimático oceánico del Niño-Oscilación del Sur (ONI).

El ONI rige la variabilidad interanual del régimen de precipitación de la zona. Este indicador durante el período de estudio permite analizar la influencia de El Niño entre finales de 2018 e inicios del 2020, contrastando con la fuerte y sostenida La Niña que se registró desde el segundo semestre de 2020 hasta el año 2022 (Ver Figura 30). Este evento La Niña fue nombrado el triple episodio de La Niña, por su larga duración.

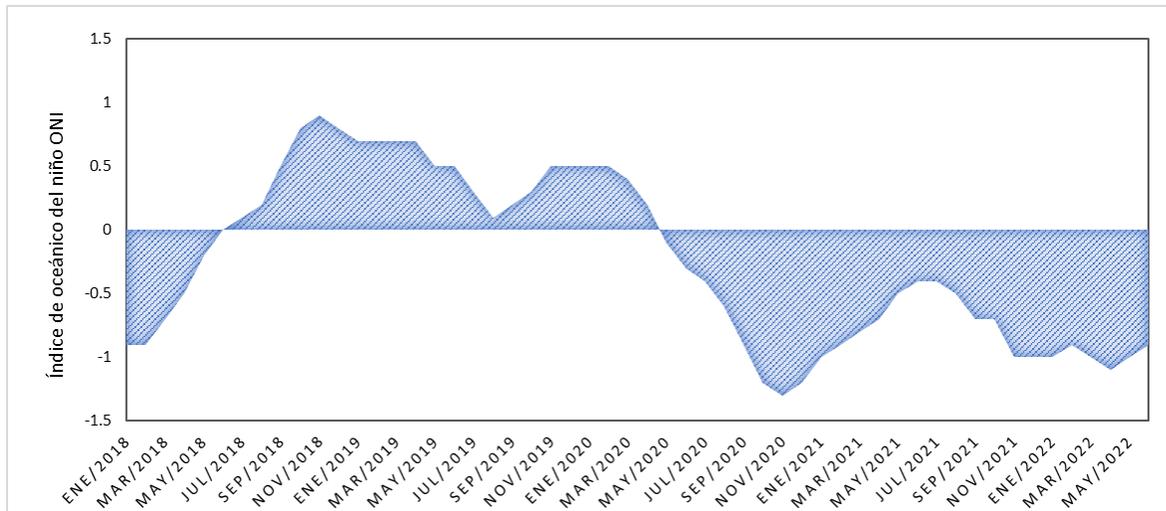


Figura 30. Comportamiento del índice oceánico del niño ONI  
(Fuente NOAA.2023)

De la evolución interanual de las variables meteorológicas se puede observar un ciclo consistente pero que presenta variaciones en las intensidades a lo largo de los años. En este escenario, se analizan a continuación dichas diferencias con respecto a la influencia del fenómeno de El Niño o su fase opuesta de La Niña.

La variación interanual del ENSO es un fenómeno que supera la escala de la meteorología local y tiene impactos sobre el viento, la cobertura de nubes, la precipitación, y también afecta la temperatura del aire y la estabilidad atmosférica (Mohammadrezaei et al., 2022). En este escenario, se puede notar que las variables que presentan la mayor variabilidad entre los años analizados son temperatura, humedad y precipitación, mientras que en las variables restantes no se pueden asociar las diferencias notadas a lo largo de los años con las dos fases del ENSO presentes durante el período.

Durante la influencia de El Niño (identificado en azul), se observa que la temperatura alcanza sus mayores valores y la humedad relativa sus valores más bajos (2018-2020). Lo anterior se explica debido a que durante la fase de El Niño, los vientos alisios que normalmente soplan de este a oeste a través del Pacífico ecuatorial se debilitan. Esto afecta la evaporación del océano y la transferencia de humedad hacia la atmósfera (Cerón et al., 2021). Como resultado para la zona de estudio, se evidencia durante este período una disminución en la cantidad de humedad disponible para la precipitación en la región. De igual manera, durante la fase de El Niño se registran las temperaturas más altas en Colombia debido a que la temperatura de la superficie del mar en la región central y oriental del Pacífico ecuatorial, son más cálidas de lo normal, lo cual puede tener un impacto en los patrones climáticos de esta variable en el país.

Por otro lado, en el año 2021 bajo la influencia de la niña, se notan las precipitaciones más altas en la zona de estudio. Durante La Niña, se genera un aumento de la intensidad en los vientos que soplan de este a oeste a través del Pacífico ecuatorial. Lo anterior, favorece la evaporación del agua desde la superficie del océano, la cual se transporta hacia las regiones cercanas a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). En la ZCIT y gracias a la convergencia de estos vientos, se obtiene una mayor formación de nubes y precipitación con respecto a otros períodos.

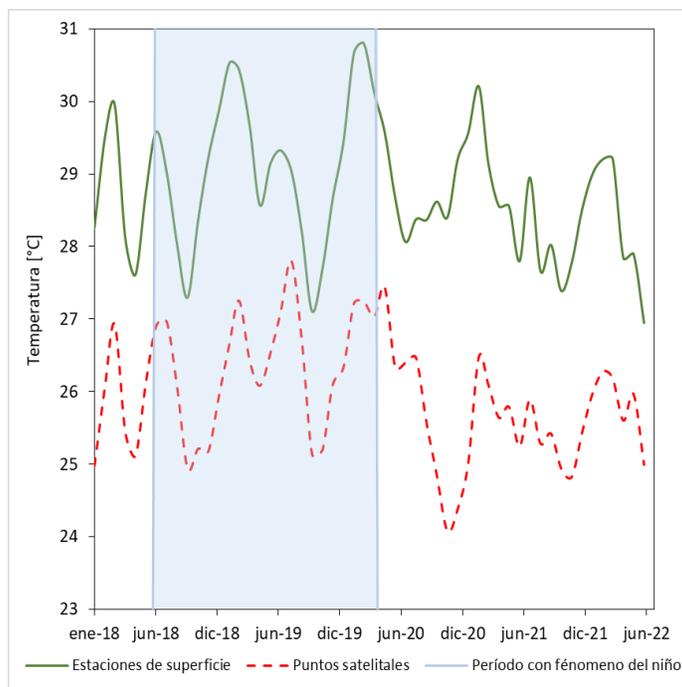


Figura 31. Evolución interanual 2018-2022 de la temperatura ambiente

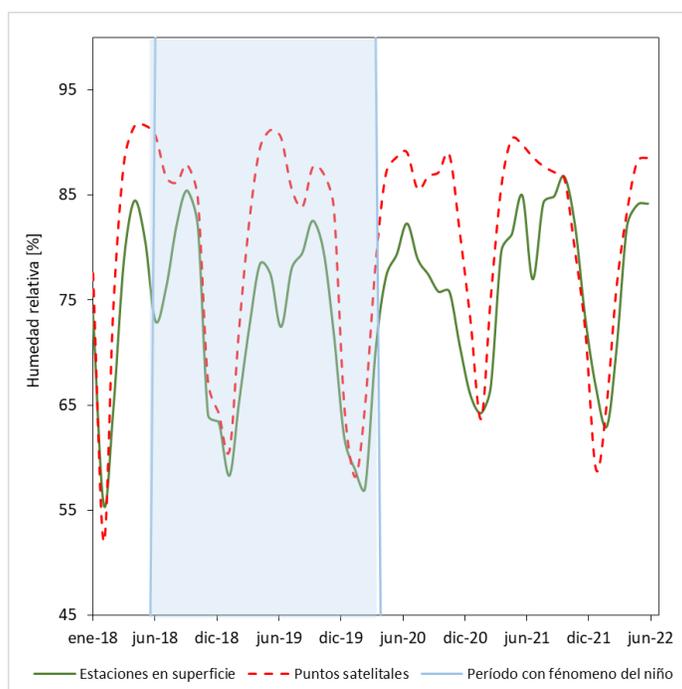


Figura 32. Evolución interanual 2018-2022 de la humedad relativa

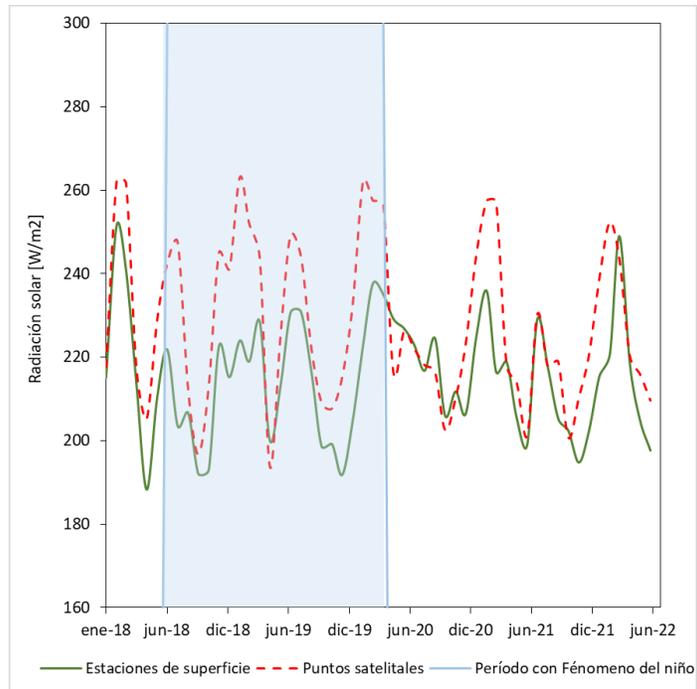


Figura 33. Evolución interanual 2018-2022 de la radiación solar

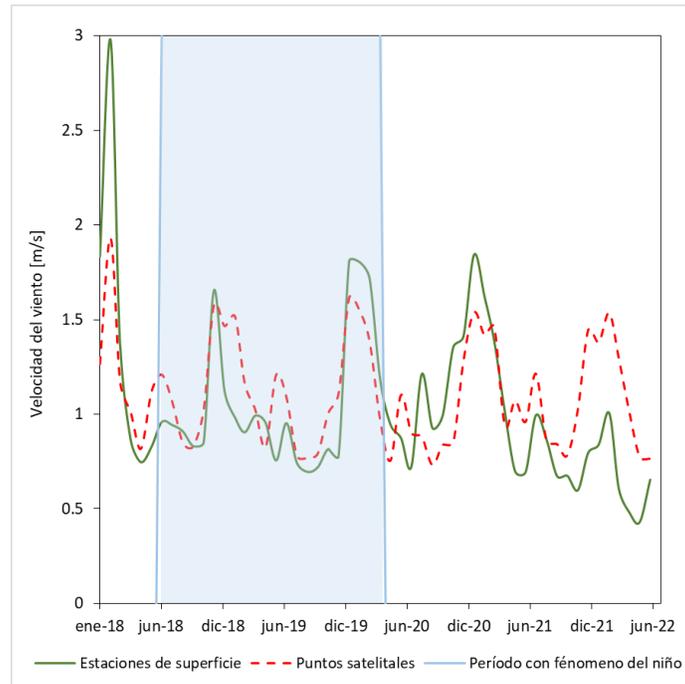


Figura 34. Evolución interanual 2018-2022 de la velocidad del viento

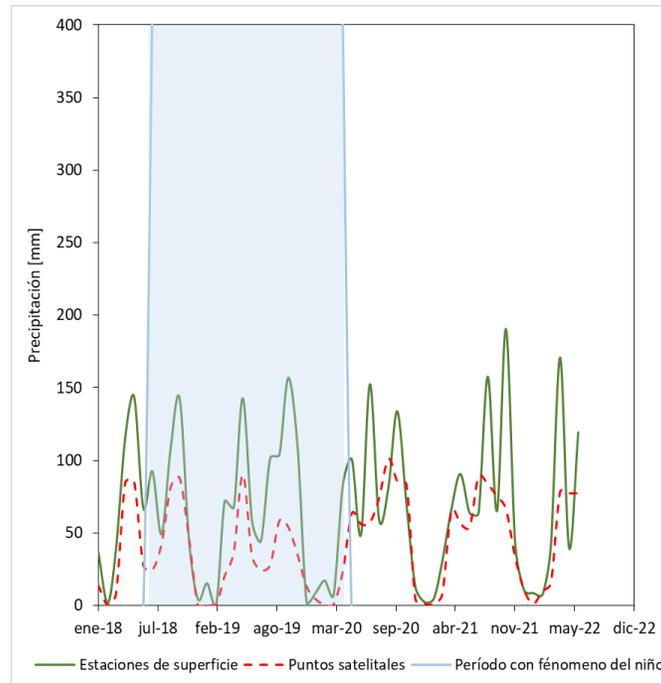


Figura 35. Evolución interanual 2018-2022 de la precipitación

### 3.2 Análisis de calidad del aire

Los análisis de calidad del aire se realizan sobre las variables de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . De acuerdo con la red de monitoreo del SEVCA\_ZCC, se cuenta con registros horarios de equipos automáticos Topas Turnkey en las estaciones de medición en superficie. Las mediciones satelitales cuentan con registros cada 3 horas (1 h, 4 h, 7 h, 10 h, 13 h, 16 h, 19 h, 22 h) de las mismas variables, y fueron obtenidas de la base de datos de Copernicus, específicamente del Servicio de Monitoreo Atmosférico CAMS (<https://atmosphere.copernicus.eu/charts/packages/cams/>).

En la Tabla 6 se presentan las estaciones de monitoreo en superficie seleccionadas y el porcentaje de disponibilidad de datos y datos faltantes en el conjunto de mediciones de cada punto. Catalogando como faltantes a las 3 frecuencias más altas de datos no disponibles de forma continua en resolución horaria.

La resolución temporal de la información tanto en las estaciones de superficie como en los puntos satelitales, permitió realizar el análisis en diferentes escalas temporales, vía la construcción de los ciclos anuales y diurnos, calculados con base a la media aritmética en cada escala de interés y presentados a continuación.

Tabla 6. Mediciones de calidad del aire SEVCA\_ZCC

Estación	Variable	Disponible%	Cantidad de faltantes*	Períodos de faltantes
ZM3	PM <sub>10</sub>	94.7	1003-355-337	29/03/2020-10/05/2020, 22/11/2020-07/12/2020,
	PM <sub>2.5</sub>	94.6	1003-355-337	18/05/2022-31/05/2022
ZM13	PM <sub>10</sub>	95.0	491-371-273	20/01/2022-09/02/2022, 13/11/2021-09/2021, 17/08/2021-28/08/2021
ZM5	PM <sub>10</sub>	81	1117-354-177	01/01/2018-16/02/2018, 03/01/2022-26/01/2022,
	PM <sub>2.5</sub>	81	1117-574-354	15/11/2019-29/11/2019
ZM9	PM <sub>10</sub>	92.6	1498-374-96	28/01/2021-31/03/2021, 21/12/2020-06/01/2021,
	PM <sub>2.5</sub>	92.6	1498-374-96	21/04/2021-25/04/2021
ZM6	PM <sub>10</sub>	91.3	481-214-202	16/04/2021-06/05/2021, 16/04/2019-20/04/2019,
	PM <sub>2.5</sub>	91	481-214-202	29/11/2020-07/12/2020

\*Se denomina faltantes a las 3 frecuencias más altas de datos no disponibles de forma continua en frecuencia horaria

Aunque la información de los puntos de monitoreo en superficie corresponde a mediciones de los equipos automáticos, las estaciones seleccionadas cuentan con muestras manuales de material particulado que fueron recolectadas cada tercer día, utilizando equipos TE-Wilbur muestreadores de alto volumen que operaron por 24 horas en el período de estudio. Dichas mediciones fueron utilizadas para validar los períodos de faltantes durante el análisis del ciclo anual, luego de comprobar por medio de una prueba de diferencia de medias (Tukey-Tabla 7) que no existían diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones automáticas y manuales, encontrando un valor  $p > 0.05$  para todas las variables.

Tabla 7. Prueba de Tukey (Mediciones manuales Vs. automáticas)

Estación	Variable	Prueba de Tukey
		Valor p
ZM3	PM <sub>10</sub>	0.24
	PM <sub>2.5</sub>	0.13
ZM13	PM <sub>10</sub>	0.88
ZM5	PM <sub>10</sub>	0.13
	PM <sub>2.5</sub>	0.60
ZM9	PM <sub>10</sub>	0.69
	PM <sub>2.5</sub>	0.48
ZM6	PM <sub>10</sub>	0.99
	PM <sub>2.5</sub>	0.21

### 3.2.1 Ciclo anual

Los resultados de calidad del aire en las estaciones de superficie muestran concentraciones promedio de  $32.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (IC95%:  $32.45\text{-}32.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $8.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $8.68\text{-}8.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  respectivamente. En la Figura 36 se presenta el ciclo anual de los contaminantes para cada uno de los puntos de monitoreo en superficie, así como para la información satelital.

Para ambos contaminantes, y de forma general para todos los puntos de monitoreo, se observa un marcado ciclo anual bimodal con valores mayores entre febrero-marzo, y valores menores alrededor de los meses septiembre-noviembre. Las estaciones de monitoreo en superficie exhiben entre ellas valores mensuales diferentes. Las estaciones con mayores valores de  $\text{PM}_{10}$  en promedio durante todo el año son ZM13, ZM9 y ZM3, con valores alrededor de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por encima de las demás estaciones (ZM5 y ZM6). Con relación al contaminante  $\text{PM}_{2.5}$ , para este caso la estación ZM13 no reporta valores disponibles y se evidencian las concentraciones más altas en ZM3 a lo largo del año. En el ciclo anual de  $\text{PM}_{2.5}$  se aprecia una variabilidad inferior en las mediciones entre los puntos de monitoreo, con una diferencia promedio de  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  entre las estaciones de máximos y mínimos reportes.

Estas diferencias en los reportes de material particulado entre las estaciones de monitoreo, puede deberse a la ubicación de las mismas con respecto a los polígonos mineros, ya que las estaciones que reportan las concentraciones más altas (ZM13, ZM9 y ZM3) son las que se encuentran a menos de 3 km del polígono minero más cercano. Estas diferencias en los reportes de material particulado resultan ser más evidentes durante los primeros meses del año, período que de acuerdo con la sección anterior, se caracteriza por precipitaciones escasas, altas temperaturas y radiación solar. De igual forma, la topografía del área puede influir en la concentración de material particulado. Por ejemplo, para áreas geográficas rodeadas de cuerpos montañosos que atrapan el aire, como sería en este caso el escenario más crítico en ZM9 (cercanía con la Serranía del Perijá), se pueden experimentar concentraciones más altas de partículas en condiciones de vientos bajos, ya que el movimiento del aire es limitado y las partículas tienden a acumularse.

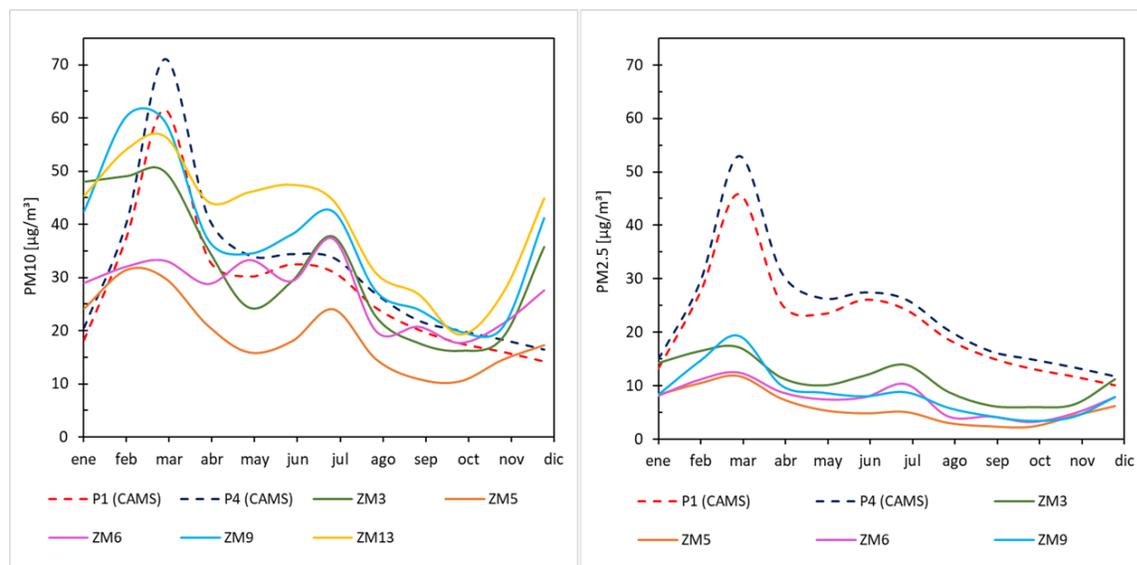


Figura 36. Ciclo anual de Material particulado  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$

Adicionalmente, se realizó una comparación entre las mediciones obtenidas por las estaciones de superficie y el conjunto de datos de origen satelital. Un buen ajuste se destaca para el contaminante  $PM_{10}$ , con una subestimación del 5% en los datos satelitales, mientras que para el  $PM_{2.5}$ , a pesar de contar con tendencias similares, se nota una sobreestimación del 63% en el conjunto de datos satelitales, encontrando resultados consistentes con calibraciones realizadas para este contaminante en el paquete CAMS a nivel global (Jin et al., 2022).

Las concentraciones del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  fueron comparadas con los estándares normativos colombianos de calidad del aire vigentes, según la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (promedio anual para  $PM_{10}$  de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para  $PM_{2.5}$  de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  -media aritmética). De igual manera, fueron comparadas con los valores máximos permisibles recomendados por la Organización Mundial de la Salud en el 2021 (media anual para  $PM_{10}$  de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para  $PM_{2.5}$  de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Las medias móviles de los contaminantes muestran en la Figura 37 y Figura 38 que las concentraciones anuales se encuentran por encima del límite máximo permisible de la OMS, mientras que la mayoría de las estaciones se encuentran en cumplimiento del límite normativo Colombiano (Resolución 2254 del 2017). Sin embargo, durante los últimos años se evidencia una disminución en las concentraciones de la mayoría de los puntos, con un promedio de reducción entre  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  respectivamente. En los puntos ZM13 y ZM9 se nota una tendencia al aumento en los últimos años analizados. Con respecto a estos dos puntos, se resalta que son los únicos que no se rigen bajo una tendencia similar en la media móvil anual, donde es importante mencionar que éstos presentaron influencia de fuentes locales de contaminación relacionadas con quema de basuras y uso de cocina de leñas durante el inicio del período de monitoreo; actividades que durante los últimos años han disminuido gradualmente debido a campañas realizadas en el territorio (CORPOCESAR, 2021).

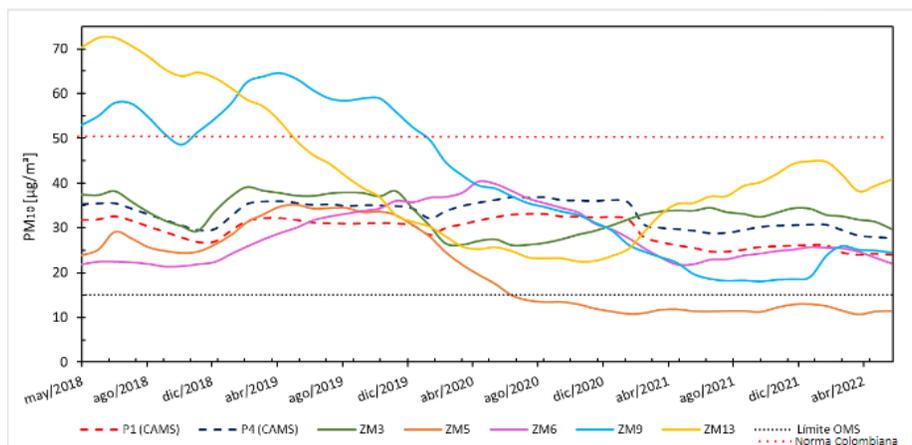


Figura 37. Media móvil anual  $PM_{10}$

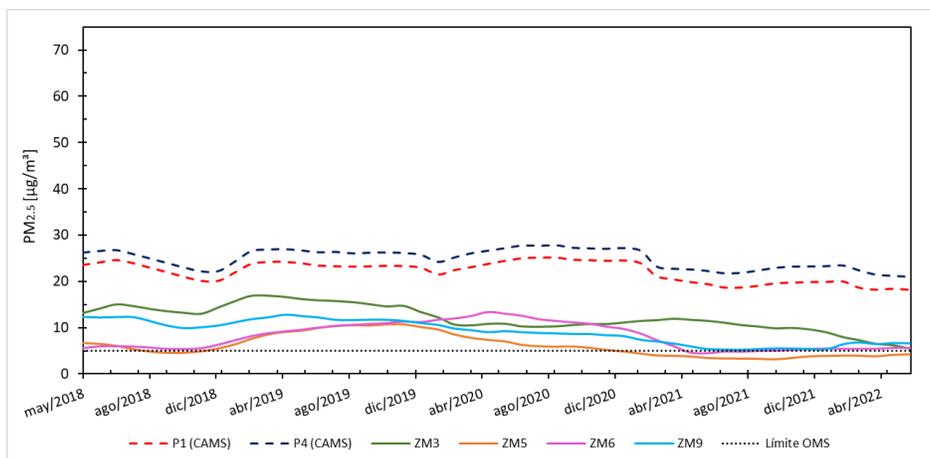


Figura 38. Media móvil anual  $PM_{2.5}$

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de analizar la variabilidad espacial de las mediciones de los contaminantes. Este análisis muestra que en el conjunto de datos existe al menos una combinación de estaciones que presentaban diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En este sentido, se procedió a realizar la prueba Post-Hoc (Figura 38) para encontrar los pares de estaciones que presentan diferencias en sus reportes de material particulado.

En la Figura 38 se puede ver que la mayoría de los intervalos para el valor medio entre grupos contiene el valor cero, lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos. Sin embargo, los puntos satelitales y las estaciones de superficie ZM5 y ZM13, muestran combinaciones que registran desviaciones entre los reportes de material particulado. Estas diferencias en el caso de ZM5 responden a la menor influencia de las fuentes de material particulado debido a la ubicación de este punto, el cual de acuerdo con los análisis de la sección anterior, se encuentra lejos de los polígonos mineros y en contra de los vientos desde estas direcciones. De igual manera, se aprecia en la Figura 35 que este punto de monitoreo registra la menor variabilidad a lo largo del ciclo anual de material particulado, destacando que para esta estación se presentan en general los menores valores de temperatura, radiación solar y velocidad del viento.

Para la estación ZM13 se observa en la Figura 38 que presenta diferencias significativas con dos puntos de monitoreo: ZM5 (analizado anteriormente) y el punto satelital P1. Las diferencias encontradas con respecto al punto P1 se podrían explicar tanto a la naturaleza de la medición satelital como por la influencia de múltiples fuentes locales de contaminación durante períodos específicos en ZM13. Este resultado es consistente con la tendencia observada en la media móvil para esta estación, la cual muestra un comportamiento diferenciado para este punto de monitoreo, principalmente durante los primeros años del período de interés. En particular para ZM13, se aprecia que las condiciones presentadas en la sección de meteorología registran los mayores valores de temperatura y velocidad del viento para la zona, lo cual puede estar asociado con una mayor variabilidad de los niveles de material particulado.

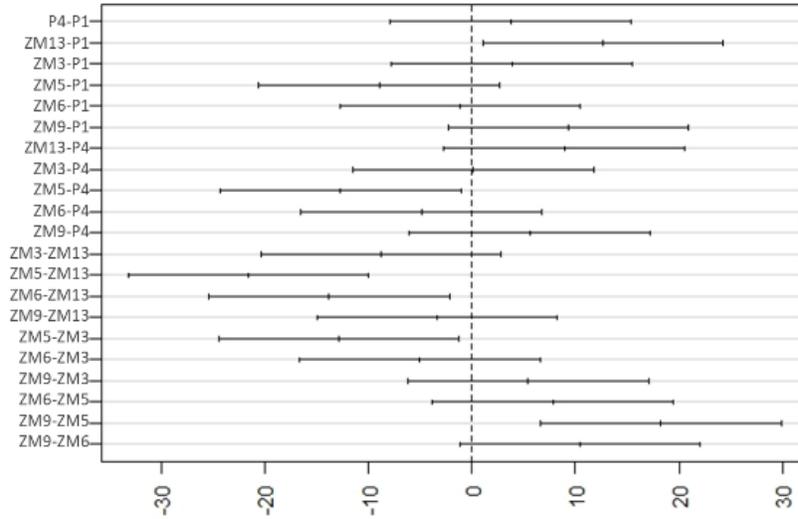


Figura 39. Diferencias en niveles medios por punto de monitoreo

Al tanto de las diferencias entre los reportes de las estaciones de monitoreo, se procede a identificar por medio de análisis de componentes principales (PCA) el comportamiento de las estaciones con respecto a los puntos de monitoreo restantes (Figura 40). El PCA permite reducir la dimensión de las mediciones en dos componentes que agrupan una variabilidad superior al 80% para identificar de manera rápida las similitudes y diferencias entre los reportes de los puntos de monitoreo.

En la Figura 40 se observa que en el caso de  $PM_{10}$ , la estación ZM5 no presenta similitudes importantes con las estaciones de superficie restantes, debido a su ubicación y la dirección de los vientos en dirección contraria de los polígonos mineros de la zona. Por otra parte, entre las estaciones de monitoreo más cercanas geográficamente se aprecian similitudes en sus reportes, como lo son ZM6-ZM9 y ZM13-ZM3. En términos generales, el material particulado puede experimentar acumulaciones locales en condiciones de vientos bajos como los presentados para la zona de estudio (ver sección anterior). La baja velocidad del viento dificulta el transporte y la dispersión de estas partículas, lo que puede llevar a concentraciones más altas cerca de los puntos ubicados alrededor de los mismos polígonos mineros o fuentes de emisión, lo cual ocasiona tendencias y concentraciones similares en los contaminantes atmosféricos en las estaciones cercanas a ellos.

Se aprecia un escenario similar para el caso de  $PM_{2.5}$ , donde la estación ZM5 es la que difiere en mayor medida de los puntos de monitoreo restantes. Sin embargo, se destaca que para este contaminante se aprecia un conjunto de datos con menor variabilidad en sus mediciones. Lo anterior es consistente con la naturaleza de este contaminante, ya que el  $PM_{2.5}$  al ser más pequeño tiene un tiempo de residencia superior en el aire, lo cual puede homogeneizar los niveles del contaminante en la zona (Ulloa et al., 2022). De igual manera, la baja velocidad del viento de la zona, principalmente en ZM5 donde se reportan las velocidades más bajas a lo largo del año, no favorece la dispersión de estas partículas y puede generar baja variabilidad de los niveles de los contaminantes en esta estación.

Por otro lado, la mayor variabilidad en las mediciones de  $PM_{10}$  entre las estaciones de monitoreo, se puede asociar a diversos factores. En primer lugar, el tamaño aerodinámico superior de este contaminante proviene de una gama más amplia de fuentes, por lo cual la influencia de múltiples factores, dependiendo de la ubicación del punto de monitoreo, puede llegar a influir en los niveles de  $PM_{10}$ . De igual forma, al ser más grandes, las partículas de  $PM_{10}$  pueden llegar a ser más sensibles a las variaciones de las condiciones

meteorológicas de la zona, lo que contribuye a mayores diferencias reportadas en las mediciones. Sin embargo, a pesar de registrar variaciones entre las mediciones reportadas por los puntos de monitoreo, en general las contribuciones de las mediciones a la variabilidad total del conjunto, son muy parecidas en ambos casos ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ), lo que supone fuentes de contaminación comunes para las estaciones.

Con respecto a los puntos satelitales se observa que para ambos contaminantes estos dos puntos (P1 y P4) se encuentran separados del grupo de estaciones de superficie, notando diferencias significativas entre ellos. Estas diferencias se asocian a la naturaleza de la medición entre ambos conjuntos de datos (satelital y superficie).

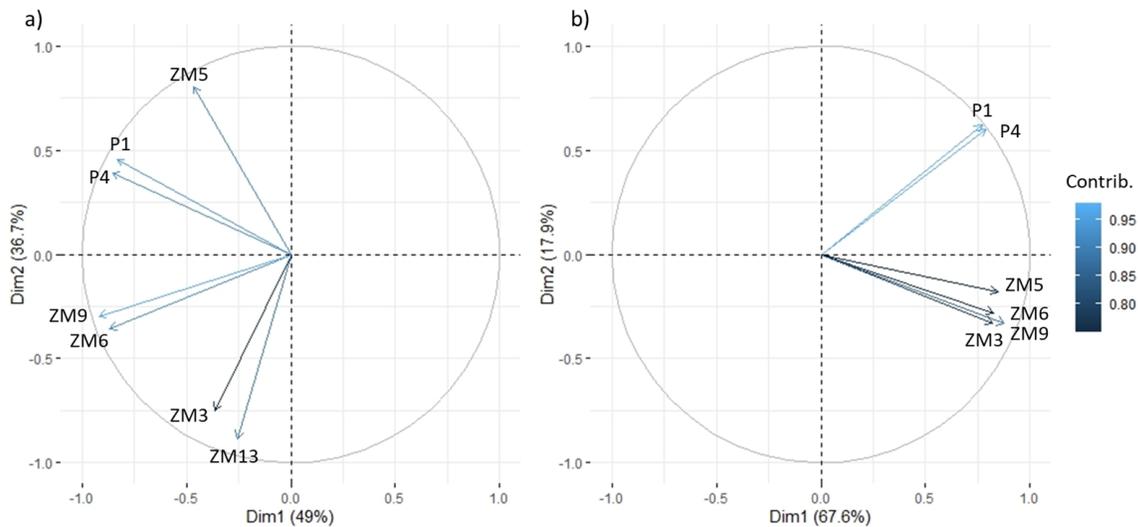


Figura 40. Análisis de componentes principales PCA a)  $PM_{10}$  b)  $PM_{2.5}$

Adicionalmente, con el propósito de conocer la relación existente entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se ajustó un modelo de regresión lineal durante cada trimestre para las estaciones que miden simultáneamente estos parámetros, dando como resultado correlaciones altas en la mayoría de los períodos, con ajustes superiores a 0.6 (Ver Tabla 8). Altas correlaciones entre estos contaminantes pueden indicar un bajo nivel de alteración de las muestras y que las fuentes de contaminación principales no varían de forma apreciable en el tiempo. Resultados similares se han reportado en ciudades de la Costa Caribe Colombiana como Barranquilla y La Guajira (Duarte et al., 2022; Rojano, Manzano, et al., 2018).

En este sentido, de los resultados de la Tabla 8 y partir de modelos de receptor realizados en la zona (M. Morales, 2018), se puede presumir una posible fuente común para ambos contaminantes (polígonos mineros). Sin embargo, se resalta que aunque los resultados son consistentes en la mayoría de los períodos analizados (DEF, MAM y JJA), se aprecia una disminución de la correlación durante el trimestre SON. Dichas variaciones se asocian a los cambios en la dinámica de los contaminantes que responden a las condiciones meteorológicas durante este trimestre. En la tabla 4 se observa que durante septiembre-noviembre se registran altas precipitaciones y humedad relativa, baja radiación solar y temperatura ambiente. Estas características en la meteorología contribuyen a una mayor deposición húmeda durante este período (SON) que disminuye la relación entre los contaminantes atmosféricos.

Tabla 8. Coeficientes de regresión lineal entre PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>

PM <sub>2.5</sub> =a*PM <sub>10</sub> +b	DEF			MAM			JJA			SON		
	a	b	r2									
ZM3	0.3	0.73	0.63	0.36	-0.1	0.76	0.47	-2.54	0.65	0.12	4.11	0.18
ZM5	0.28	1.66	0.9	0.34	0.67	0.86	0.16	1.36	0.5	0.2	0.66	0.49
ZM6	0.43	-3.64	0.83	0.39	-2.52	0.6	0.33	-2.19	0.87	0.29	-1.56	0.41
ZM9	0.18	1.56	0.89	0.22	3.2	0.68	0.14	2.54	0.85	0.06	2.6	0.31
P1	0.74	-0.36	0.99	0.74	0.68	0.99	0.87	-2.46	0.99	0.84	-1.96	0.99
P4	0.74	-0.41	0.99	0.73	0.67	0.99	0.9	-3.85	0.99	0.84	-1.96	0.99

De los resultados presentados, es posible resaltar que a pesar de que la región de monitoreo muestra una reducción en los niveles de material particulado a lo largo de los años, se supera en la totalidad del período los niveles recomendados por la Organización Mundial de la Salud para este tipo de contaminantes (promedio anual para PM<sub>10</sub> de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y para PM<sub>2.5</sub> de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). El contaminante PM<sub>10</sub> reporta concentraciones que duplican el límite anual recomendado para la OMS ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Por otro lado, para PM<sub>2.5</sub> se reportan promedios que sobrepasan por  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  el valor de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  recomendado por la OMS.

En términos generales, los resultados anteriores permiten suponer que para la zona de estudio existe una fuente común para las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, fuente asociada a la generación de polvo desde los polígonos mineros ubicados en la ZCC. Sin embargo, existen diferencias en la variabilidad de ambos contaminantes, teniendo para el caso de PM<sub>2.5</sub> niveles más estables con respecto a PM<sub>10</sub>, debido a los tamaños de partículas y a la posible influencia de fuentes adicionales generadoras de PM<sub>10</sub> en la zona. Por otro lado, el ciclo anual del material particulado muestra de forma general un ciclo bimodal con los máximos reportes durante los primeros meses del año y los menores valores entre septiembre-noviembre para ambos contaminantes. Aunque existen diferencias en los niveles de las concentraciones entre los puntos de monitoreo. Estas diferencias corresponden al registro de las concentraciones más altas de contaminantes en los puntos más cercanos a los polígonos mineros, encontrando que las estaciones ZM13, ZM3 y ZM9 muestran los niveles más altos de material particulado en la zona.

### 3.2.2 Ciclo diurno

En la Figura 41 se presenta la evolución de los contaminantes atmosféricos durante el ciclo diurno para las estaciones de superficie y los puntos satelitales. Se observa que el material particulado exhibe un ciclo bimodal con los valores más altos entre las 06:00 h-07:00 h y posteriormente entre las 18:00 h-19:00 h, períodos relacionados con el inicio y fin de horarios laborales y académicos en la zona.

Se resalta que la estación ZM5 registra los niveles y la variabilidad más baja de ambos contaminantes, esto se debe a la ubicación de este punto de monitoreo, el cual de acuerdo con el análisis meteorológico (Figura 7) se encuentra en dirección contraria a los vientos provenientes desde las operaciones mineras. Por otra parte, las estaciones ZM13, ZM9 y ZM3 muestran las variaciones más notorias en los ciclos de los contaminantes y los valores máximos de la zona con promedios diarios de hasta  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>10</sub> y  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM<sub>2.5</sub>. En este escenario, se observa en la Figura 3 (ver análisis meteorológico), que las estaciones que registran las variaciones más notorias y las concentraciones más altas en el ciclo diurno de

material particulado corresponden a los puntos de monitoreo que de forma general registran la temperatura ambiente más alta en la zona de estudio.

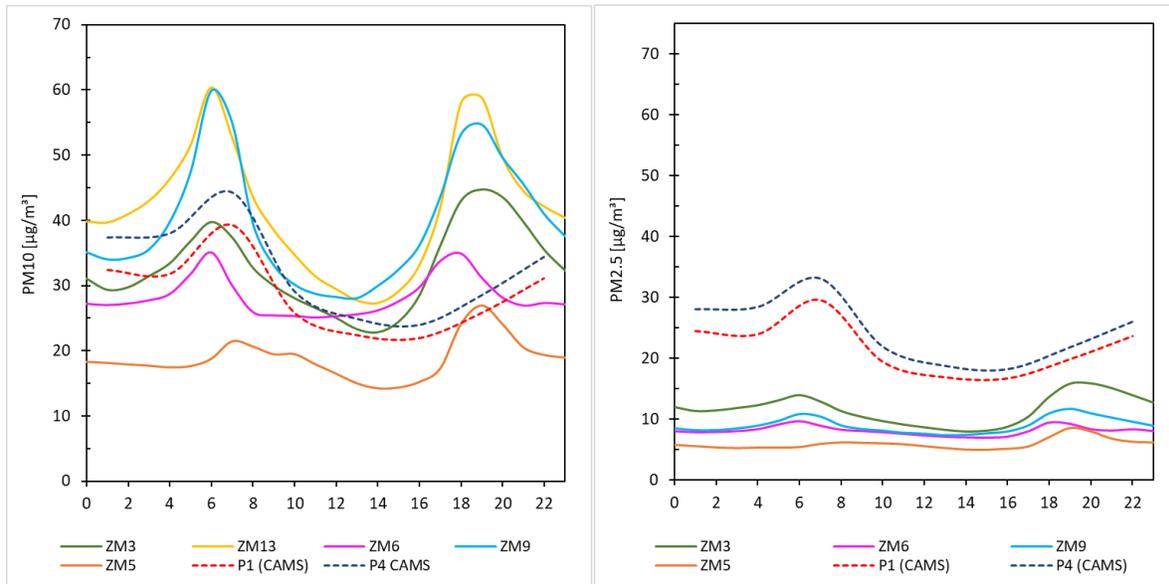


Figura 41. Ciclo diario de material particulado-  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$

Posteriormente, se realizó un análisis categorizado por día de la semana para identificar posibles cambios en los aportes de los contaminantes atmosféricos en la zona (Figura 42). Este análisis arrojó que el material particulado en la ZCC no registra variaciones significativas entre los días de la semana. Estos resultados permiten confirmar que no se presenta el “efecto de fin de semana” reportado por algunos estudios (de Vasconcellos et al., 2022); lo cual va en concordancia con la naturaleza continua de uno de los principales aportes de material particulado en la zona de estudio, la operación carbonífera en las minas.

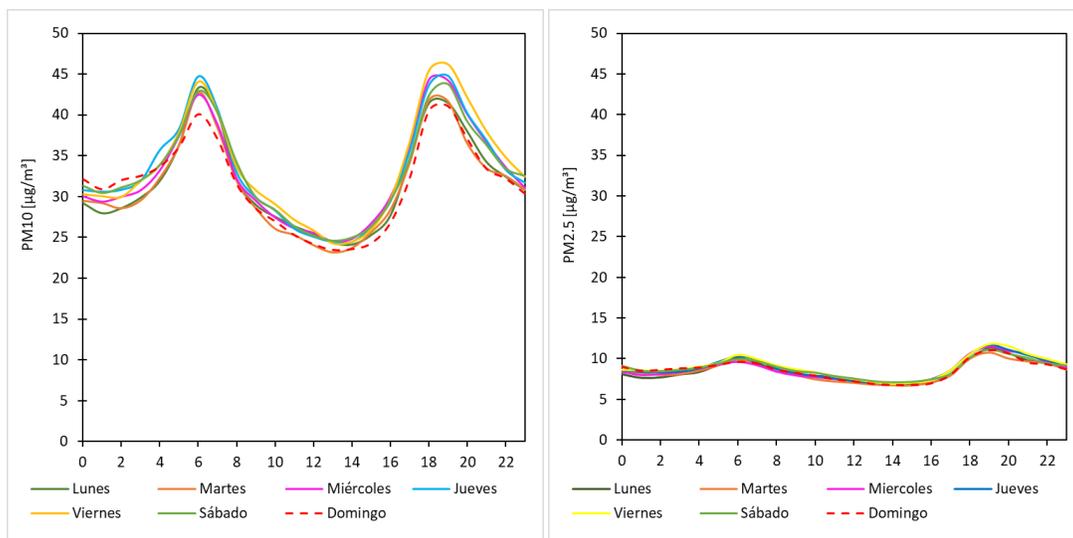


Figura 42. Análisis categorizado de material particulado por día de la semana- $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$

Finalmente, en el análisis del ciclo diurno realizado por trimestre (Figura 43) se muestra que existen diferencias significativas en las inmisiones de material particulado entre los períodos identificados (prueba de Tukey, Valor  $p < 0.05$ ). Teniendo como excepción a los trimestres DEF y MAM, ya que la prueba de diferencia de medias arrojó que no existían diferencias estadísticamente significativas (valor  $p > 0.05$ ) en los reportes de los contaminantes entre estos dos períodos.

El período DEF muestra los valores más altos de los contaminantes para la zona, con una diferencia de hasta  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con respecto al trimestre SON durante los picos de máxima concentración diaria. Estas diferencias notadas entre los trimestres con máximos y mínimos niveles de material particulado, podría responder a las variaciones de las condiciones meteorológicas analizadas en la sección anterior. De acuerdo con los análisis meteorológicos, se destaca que las diferencias entre estos dos períodos (DEF y SON) son las más notorias, ya que presentan características meteorológicas opuestas. Como se mencionó en la sección anterior y debido a la ubicación de la ZCIT en particular más al sur durante DEF, se registra en este período los valores más bajos de precipitación. Sin embargo, se presentan los valores más altos de temperatura, radiación solar y velocidad del viento, lo cual a su vez genera mayor turbulencia en la atmósfera obteniendo mayores alturas de capa límite. Por otro lado, durante los meses septiembre-noviembre, la ZCIT está en su proceso de migración desde la región al norte del país, permitiendo así que aire húmedo llegue a la zona y ocasione mayor cantidad de eventos de precipitación, y notando de igual manera menores valores de temperatura.

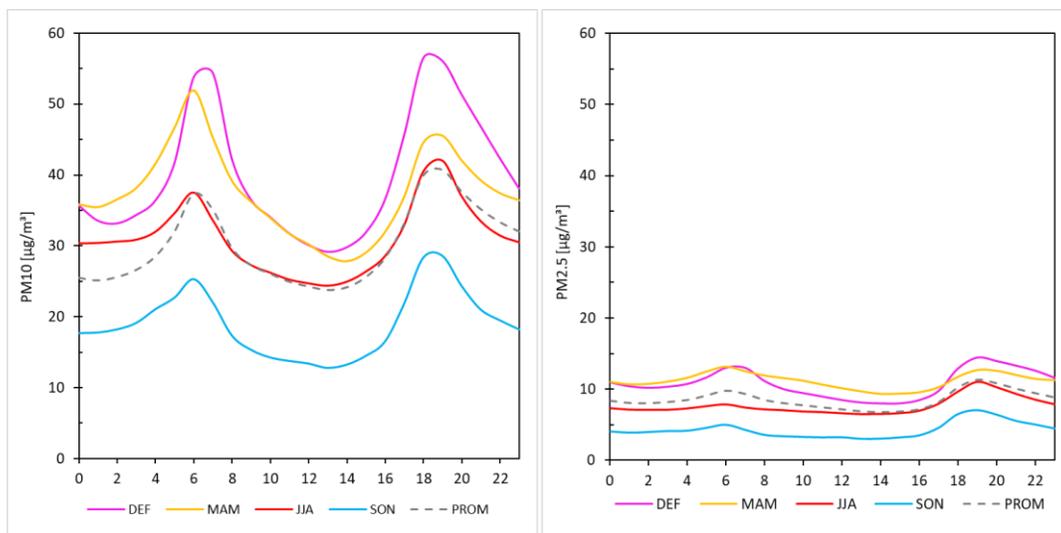


Figura 43. Análisis categorizado de material particulado por trimestre-  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$

De los resultados obtenidos con los análisis de calidad del aire, es posible decir que existe un ciclo bimodal en el ciclo diurno de los contaminantes atmosféricos, con los reportes más altos entre las 06:00 h-07:00 h y posteriormente entre las 18:00 h-19:00 h, períodos relacionados con el inicio y fin de horarios laborales y académicos en la zona. En la Tabla 5 de la sección de análisis meteorológicos, se observa que a estas horas son más débiles los efectos de la radiación solar sobre la región de estudio. Por lo tanto, las condiciones de mezcla en la vertical asociadas con mayores temperaturas y con la dispersión de contaminantes, están debilitadas con respecto a otras horas del día; esto ocasiona los aumentos en las concentraciones mostrados durante las horas en mención. La naturaleza de las fuentes generadoras de material particulado se supone continua sin ninguna variación apreciable en el tiempo. Sin embargo, durante los trimestres analizados se observan diferencias significativas entre los reportes de los

contaminantes, con los valores máximos horarios alcanzados entre diciembre y mayo. Estas diferencias en los ciclos diurnos, se asocian a las características meteorológicas de cada período que influyen en la dinámica de los contaminantes en la atmósfera, debido a que se supone que la generación de material particulado no se ve afectada de manera significativa a lo largo del año.

### 3.2.3 Análisis interanual

Adicionalmente a las escalas de mayor interés para la investigación (anual y diurna), se exploraron las variaciones interanuales del material particulado en la zona de estudio, con el objetivo de explorar posibles efectos de fenómenos climáticos que actúan en la escala interanual como el ENSO, de manera similar a la sección anterior.

En la Figura 44 y Figura 45, se identifican las concentraciones más altas (colores rojos) y más bajas (colores azules) de los contaminantes durante el período de estudio. El resultado muestra que en el año 2019 se evidencian concentraciones más altas durante el período entre enero y marzo, con concentraciones que alcanzan y superan los  $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  respectivamente. Este resultado muestra un efecto del fenómeno El Niño de ese año exacerbando las concentraciones de contaminantes para la región de estudio. En el mismo sentido, concentraciones más bajas se aprecian durante los años 2021 y 2022, tanto para el  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , años con condiciones de La Niña, evidenciando el papel de este tipo de fenómenos macroclimáticos sobre la evolución de las concentraciones de contaminantes para la región. Se aclara que estos resultados se presentan de manera general para todas las estaciones de monitoreo.

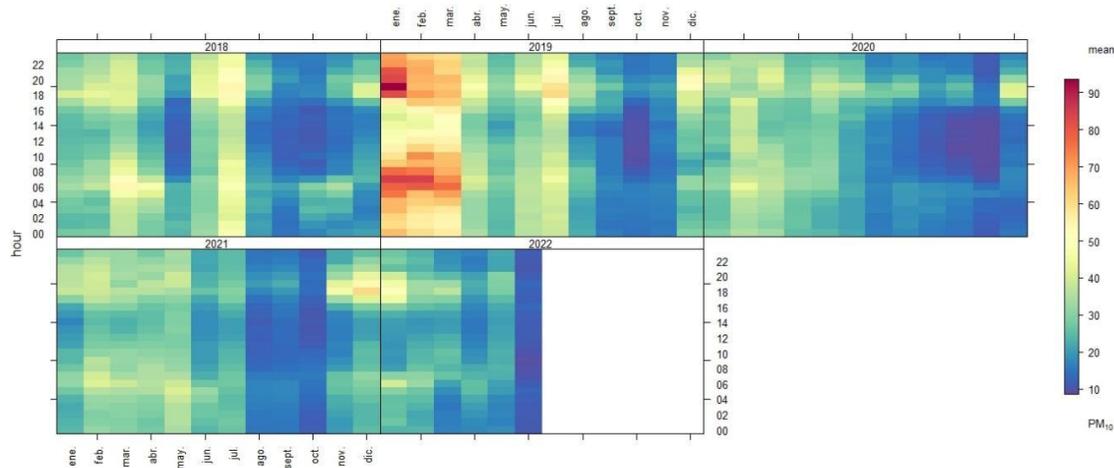


Figura 44. Análisis interanual de evolución promedio del  $\text{PM}_{10}$

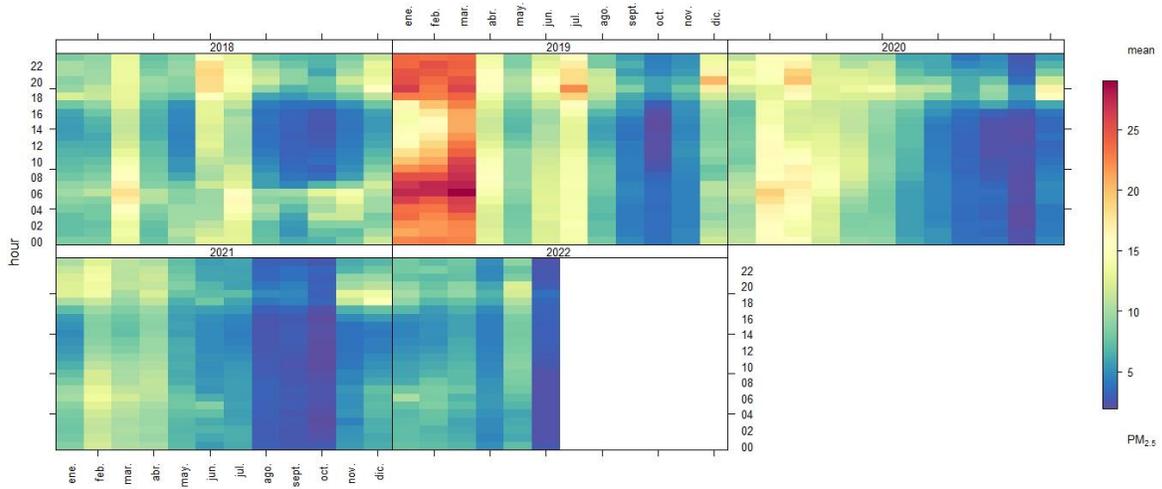


Figura 45. Análisis interanual de evolución promedio del PM<sub>2.5</sub>

Adicionalmente, en la Figura 46 y Figura 47 se exploró la influencia del ENSO en la evolución temporal del material particulado. Se observa relación entre el comportamiento del ONI y de la media móvil anual de los contaminantes. En particular se resalta la relación directa y de similar magnitud para ambas variables, con coeficiente de correlación de 0.69-PM<sub>10</sub> y 0.67-PM<sub>2.5</sub>. Estos resultados permiten decir que la variación interanual del ENSO es un fenómeno macroclimático que influye de manera directa sobre la evolución del material particulado en la zona, lo que resulta de interés para futuras investigaciones encaminadas a profundizar en los análisis de las relaciones que se evidencian con respecto a las concentraciones de material particulado y este índice macro climático.

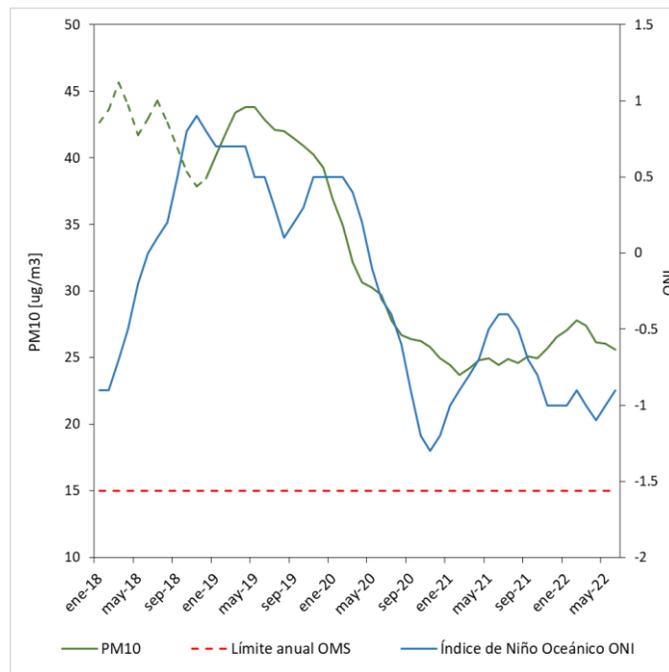


Figura 46. Evolución PM<sub>10</sub> Vs índice de niño oceánico

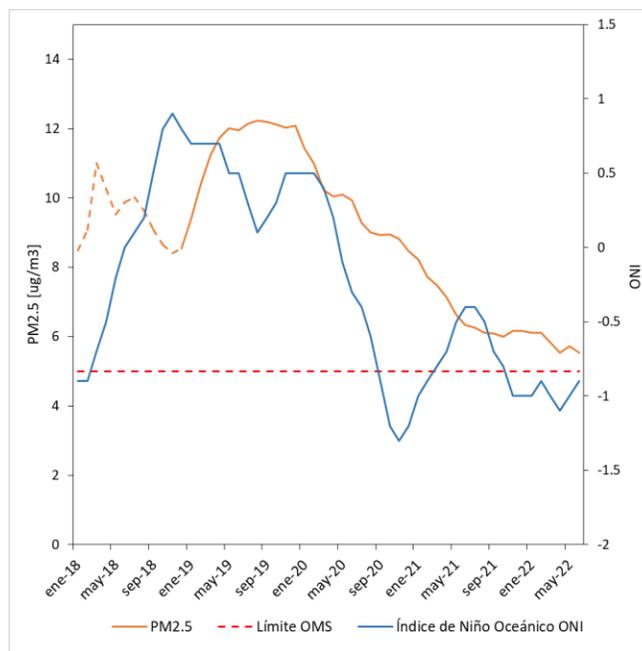


Figura 47. Evolución PM<sub>2.5</sub> Vs índice de niño oceánico

Con respecto a la distribución de datos a lo largo de los años, se observa en los diagramas de caja y bigotes de los contaminantes (Figura 48 y Figura 49), que los años bajo la influencia del Fenómeno de La Niña, que son los años 2020, 2021 y 2022, muestran menor variabilidad en los datos, notando diagramas de cajas simétricos en comparación con otros períodos. Lo anterior se podría explicar con la influencia de las condiciones meteorológicas en la dinámica de los contaminantes, ocasionando en general menores concentraciones y menor cantidad de datos atípicos (outliers) relacionados con episodios de alta contaminación. Sin embargo, en el 2020 se presenta un mayor registro de atípicos con respecto a los años 2021 y 2022. Este año está influenciado por la pandemia del Covid-19 y una alta incidencia de incendios forestales (CORPOCESAR, 2021), lo que ocasiona eventos atípicos que se traducen en mayor variabilidad para las concentraciones en las estaciones de monitoreo.

En particular, para la estación ZM9 se observa de manera notoria, que durante el año 2019 se registraron las concentraciones más altas con una mayor variabilidad en los mayores niveles de material particulado PM<sub>10</sub>, relacionado con la influencia del fenómeno de El Niño durante este período. Mientras que para la estación ZM13, se aprecian los mayores valores durante 2018 e incluso 2021, 2022. Destacando que durante los últimos años (2021 y 2022), a pesar de estar bajo la influencia de La Niña, la estación ZM13 muestra en su media móvil (Figura 36), características que sugieren un aporte de fuentes de contaminación locales que tienen como consecuencia un aumento en las concentraciones y la variabilidad registrada para este punto de monitoreo.

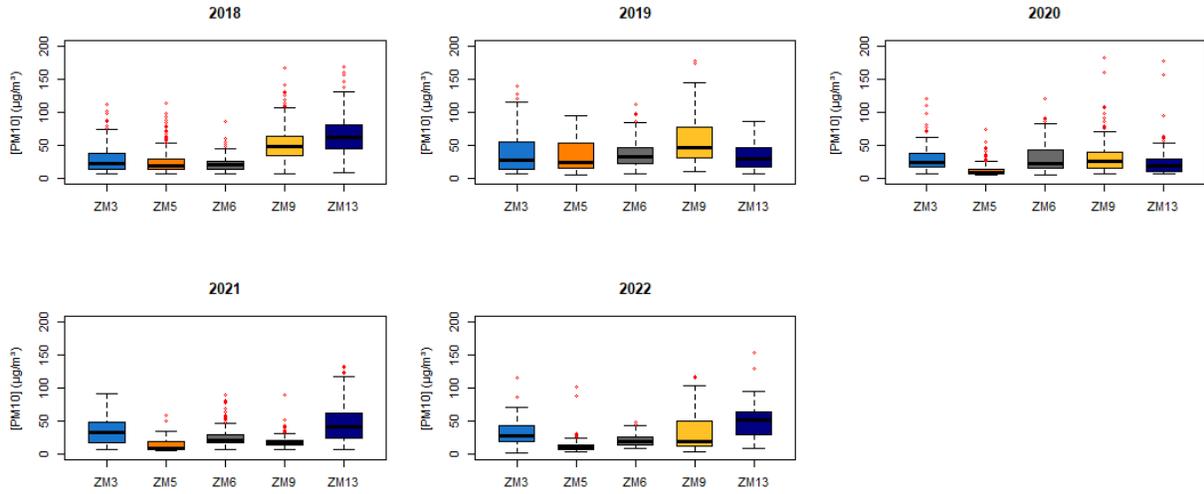


Figura 48. Diagramas de caja y bigotes anuales-  $PM_{10}$

Con relación a las diferencias notadas entre las distribuciones de las mediciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se nota de manera sostenida durante todos los años del período, que las concentraciones de menor tamaño de partícula presentan una mayor simetría en los diagramas de caja y bigotes, lo cual se encuentra relacionado con una menor variabilidad en sus reportes. Mientras que en las concentraciones obtenidas para  $PM_{10}$ , se observa un mayor rango en el cuartil superior, denotando mayor variación y concentración principalmente en los mayores valores de este contaminante atmosférico. Estos resultados son consistentes con las relaciones notadas en análisis anteriores para la evolución de estos contaminantes en mención.

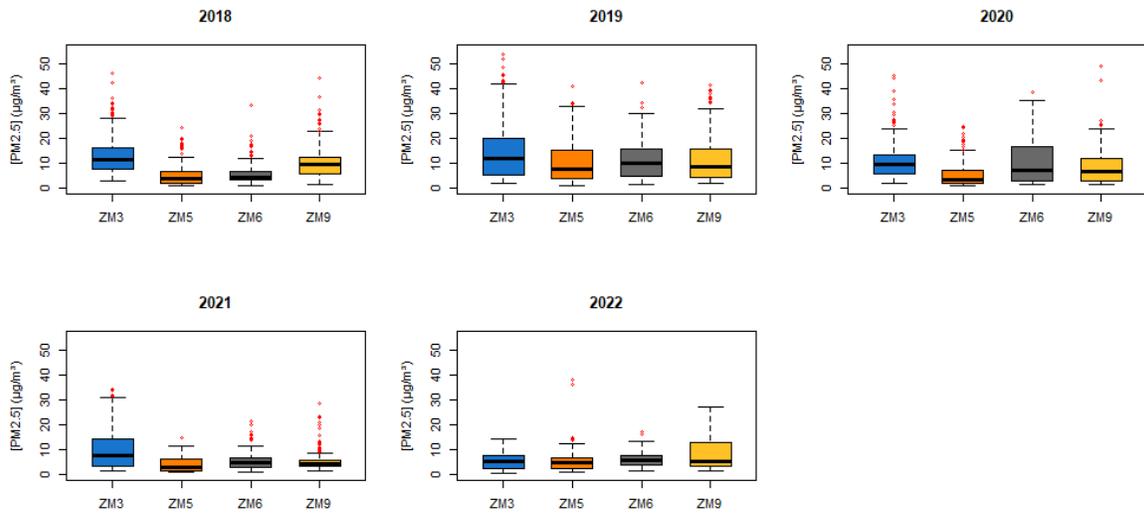


Figura 49. Diagramas de caja y bigotes anuales-  $PM_{2.5}$

### **3.3 Exploración de efectos de la variabilidad meteorológica sobre las concentraciones y el transporte de material particulado en la zona de estudio.**

En la presente sección se presenta la exploración exhaustiva de los impactos de la variabilidad meteorológica en las concentraciones y el transporte de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la zona de estudio, condiciones que previamente han sido analizadas de forma independiente.

La investigación se enmarca en la búsqueda de comprender las complejas interacciones entre las condiciones meteorológicas regionales y locales y la calidad del aire en diferentes escalas temporales de interés, reconociendo la importancia de tales factores en la distribución espacial y temporal de las partículas suspendidas en el aire. A través del análisis de los datos de meteorología y calidad del aire recopilados para la zona de estudio, se pretende analizar los mecanismos subyacentes que vinculan la variabilidad meteorológica con las concentraciones de material particulado, contribuyendo así al desarrollo de políticas y medidas de mitigación para garantizar la salud pública y preservar la calidad del aire.

#### **3.3.1 Ciclo anual**

Inicialmente se analizan los posibles efectos de la meteorología sobre el material particulado en el ciclo anual de estas variables. En principio, con el objetivo de analizar la influencia de los vientos en la concentración del material particulado, se representan las rosas de contaminación totales por medio de un gráfico polar, ubicadas con respecto a su localización satelital en cada punto de monitoreo. En las rosas presentadas en la Figura 50, se destaca que las concentraciones más bajas se muestran en color azul, mientras que a medida que se intensifican los colores se denota un aumento de los niveles del material particulado, notando en color rojo las concentraciones más altas (superiores a los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). De igual manera, a medida que las concentraciones se alejan de forma radial en el eje cartesiano, se representa un aumento de la velocidad del viento, mostrando una velocidad de  $0 \text{ m/s}$  en el origen y un máximo de hasta  $6 \text{ m/s}$  en el punto más alejado del plano.

De manera general, se observa una marcada contribución desde los polígonos mineros, con valores de concentraciones que superan los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . desde las direcciones donde se encuentran ubicadas las minas, y registrando los mayores valores desde las estaciones que se encuentran más cerca de los polígonos mineros (ZM9, ZM3 y ZM13). Se destaca que las concentraciones más altas (identificadas en color rojo) se registran a velocidades del viento superiores a los  $3 \text{ m/s}$ , lo cual indica que los principales aportes de material particulado no provienen de fuentes locales de contaminación ubicadas en los alrededores inmediatos de las estaciones de monitoreo. Lo anterior, sugiere que los aportes de las concentraciones más altas provienen desde los polígonos mineros ubicados en dichas direcciones.

Las concentraciones más bajas y homogéneas en todas las direcciones se reportan para las estaciones ZM5 y ZM6, mostrando valores de  $PM_{10}$  por debajo de los  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Específicamente para estos dos puntos de monitoreo, se asocia una menor influencia de los polígonos mineros como fuentes de contaminación. Para el caso de ZM5, como se presentó en secciones anteriores, es un punto donde los vientos presentan una predominancia desde direcciones opuestas a donde se encuentran ubicados los polígonos mineros. Mientras que para ZM6, la estación se encuentra ubicada a mayor distancia de los polígonos mineros con respecto a los puntos de monitoreo que exhiben las concentraciones más altas en la zona.

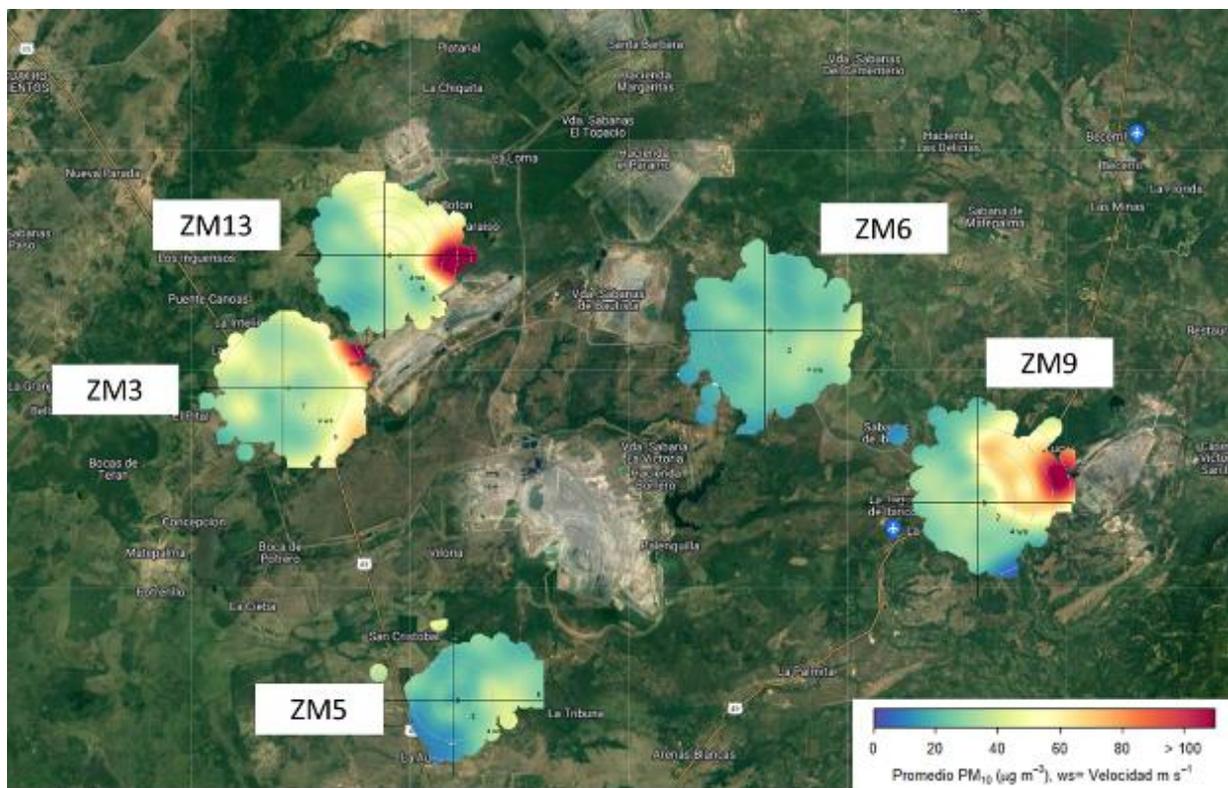


Figura 50. Rosas de contaminación totales  $PM_{10}$  (Enero 2018-Junio 2022)

De manera similar, para evaluar detalladamente el comportamiento de los vientos de acuerdo con la ubicación respecto a la actividad carbonífera, se identificaron los polígonos mineros más cercanos (fuentes más probables de MP) y se determinó sobre la ubicación satelital el intervalo angular de influencia respecto al norte de cada una de estas estaciones. Inicialmente se identifican las coordenadas geográficas de la estación de monitoreo de interés, el cual será el punto de origen para calcular el intervalo angular de influencia. Seguidamente, se traza la dirección o rumbo desde el punto de interés (estación de monitoreo) hasta el punto sobre el cual se está calculando el intervalo (inicio y fin del polígono minero más cercano). A partir de los rumbos trazados, se calculan los ángulos del intervalo, teniendo en cuenta que el norte con respecto a la estación de monitoreo representa los  $0^\circ$ . En la Figura 51 se representa la forma de medición de los ángulos de incidencia en las estaciones de calidad de aire. De igual manera, en la Tabla 9 se agrupan los ángulos de incidencia para todas las estaciones con respecto a su fuente probable más cercana, las cuales se identifican con el número del polígono minero marcado en la Figura 51.

Con esta información del intervalo angular de incidencia para los puntos de monitoreo, se calculó la influencia de la dirección del viento para las estaciones respecto a las fuentes más probables de material particulado. En este sentido, analizando las principales contribuciones del viento en las estaciones de monitoreo (rosas del viento presentadas en la Figura 7 y Figura 8) y los ángulos de incidencia reportados en la tabla 9, se observa que el mayor porcentaje de los vientos ( $>70\%$ ) provienen desde los intervalos angulares calculados, confirmando la influencia de la actividad minera en la mayoría de las estaciones, con excepción de los puntos ZM5 y P4. Se resalta que las principales contribuciones del viento en la estación de superficie ZM5 y el punto satelital P4, no provienen de las direcciones en las que se encuentran ubicados

los polígonos mineros de la zona de estudio, por lo cual el transporte de los contaminantes desde las minas puede llegar a ser inferior en estos puntos.



Figura 51. Estimación de ángulos de incidencia

Tabla 9. Ángulos de incidencia para los puntos de monitoreo

Estación	Ángulo de incidencia	Fuente probable
ZM3	25°-110°	M2
ZM5	4°-55°	M3
ZM6	268°-351°	M5-M6
ZM9	56°-102°	M4
ZM13	70°-210°	M2
P1	172°-186°	M7
P4	0°-8°	M3

Por otro lado, la construcción de este tipo de gráficos polares por trimestre (Figura 52 a Figura 54), permitió identificar la evolución de los contaminantes y realizar la comparación de los patrones interanuales. Durante los primeros meses del 2018 y 2019, las concentraciones de  $PM_{10}$  eran las más altas del período de estudio, causando períodos críticos de contaminación en los primeros meses de los años. Esta condición se evidencia para la totalidad de estaciones de superficie y en ambos puntos satelitales. En particular, las concentraciones alcanzan valores superiores a los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y a los  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , respectivamente, a velocidades desde los 0 m/s hasta los 6 m/s, lo cual permite suponer contribuciones

de fuentes de contaminación locales (velocidades inferiores a los 3 m/s) y lejanas (velocidades superiores a los 3 m/s).

En las rosas de contaminación por trimestre se observa que durante DEF y MAM se reportan las concentraciones más altas para la zona de estudio, destacando que principalmente durante estos trimestres en el año 2019 se registran las concentraciones más altas. Estos resultados son consistentes con el análisis interanual realizado en la sección anterior, que relaciona estos hallazgos con la influencia del fenómeno de El Niño durante el año en mención. De igual manera, se nota que las concentraciones más altas en DEF y MAM se presentan tanto a bajas como a altas velocidades del viento, y se destaca que las condiciones meteorológicas durante diciembre-mayo presentan similitudes, mostrando los valores más altos de temperatura, radiación solar, altura de capa límite y velocidades del viento con respecto a otros meses del año. Por otro lado, durante el período JJA, y a diferencia de DEF y MAM, las concentraciones más altas se presentan de forma localizada a velocidades superiores a los 3 m/s, lo cual sugiere aportes por fuentes lejanas de contaminación. Lo anterior, puede estar asociado a la influencia de los vientos del Sahara que se registran a mitad de año y serán analizados más adelante en esta sección.

Finalmente, para el período SON se aprecia un comportamiento con diferencias marcadas respecto a los trimestres restantes. Durante SON se registran las concentraciones más bajas en todos los años durante el período de estudio. En este trimestre se observa que las rosas de contaminación presentan concentraciones más homogéneas desde todas las direcciones con respecto a los otros períodos analizados. Sin embargo, se resalta que las concentraciones más altas se reportan a velocidades del viento inferiores a 1 m/s, lo cual sugiere que los principales aportes durante septiembre-noviembre corresponden a fuentes locales de contaminación, ubicadas en los alrededores inmediatos de las estaciones de calidad del aire.

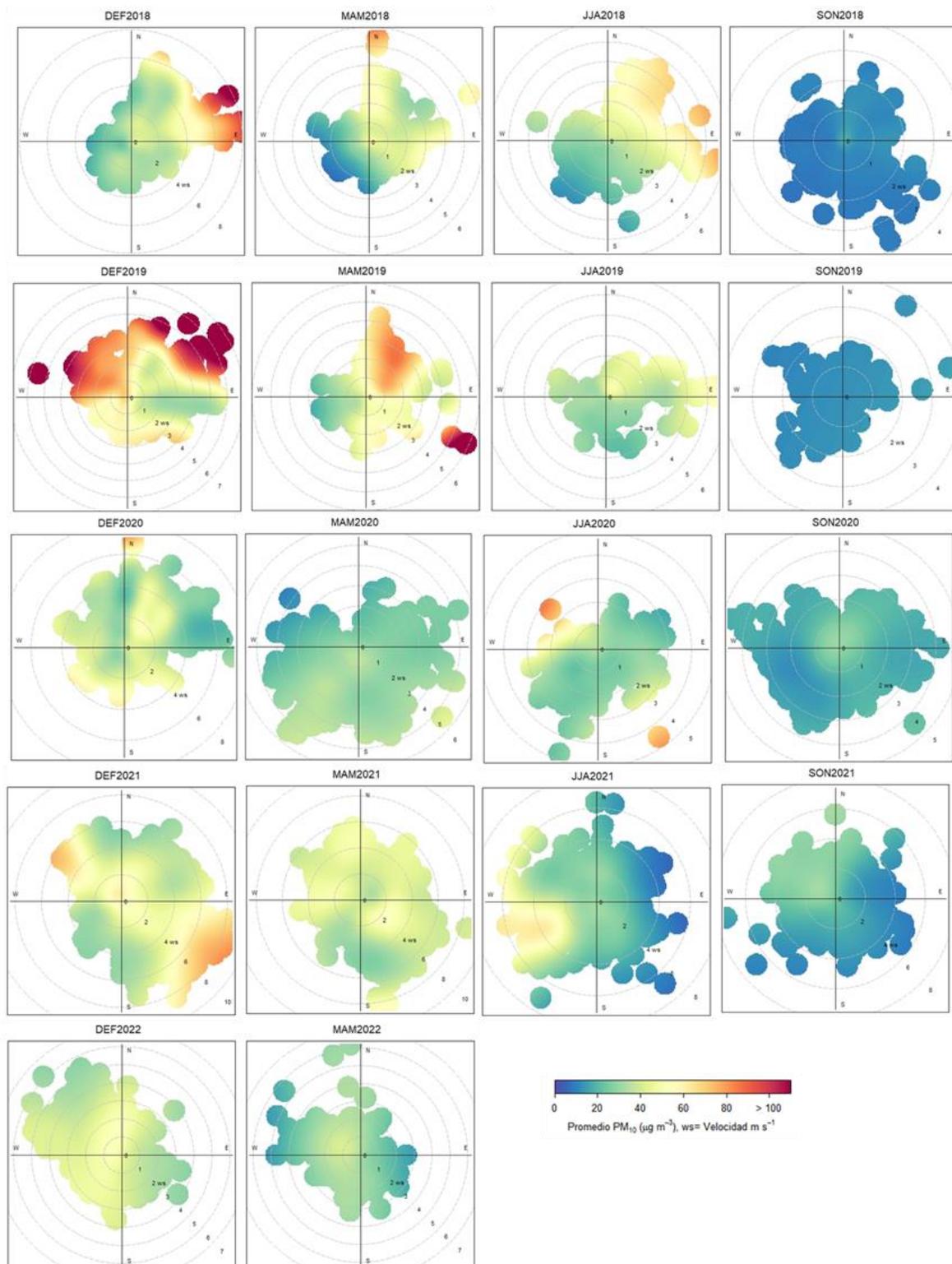


Figura 52. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico PM<sub>10</sub>-ZM3

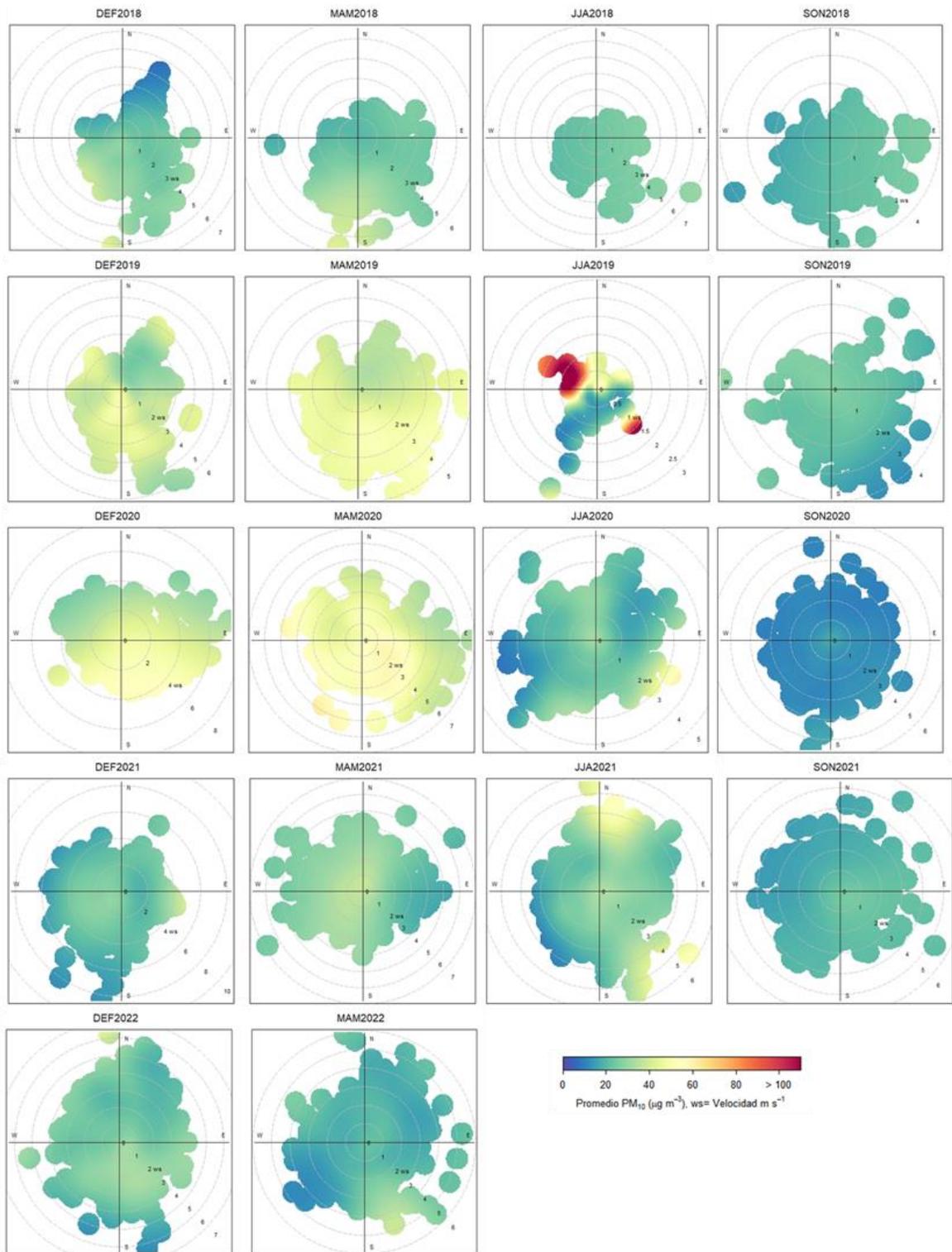


Figura 53. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico PM<sub>10</sub>-ZM6

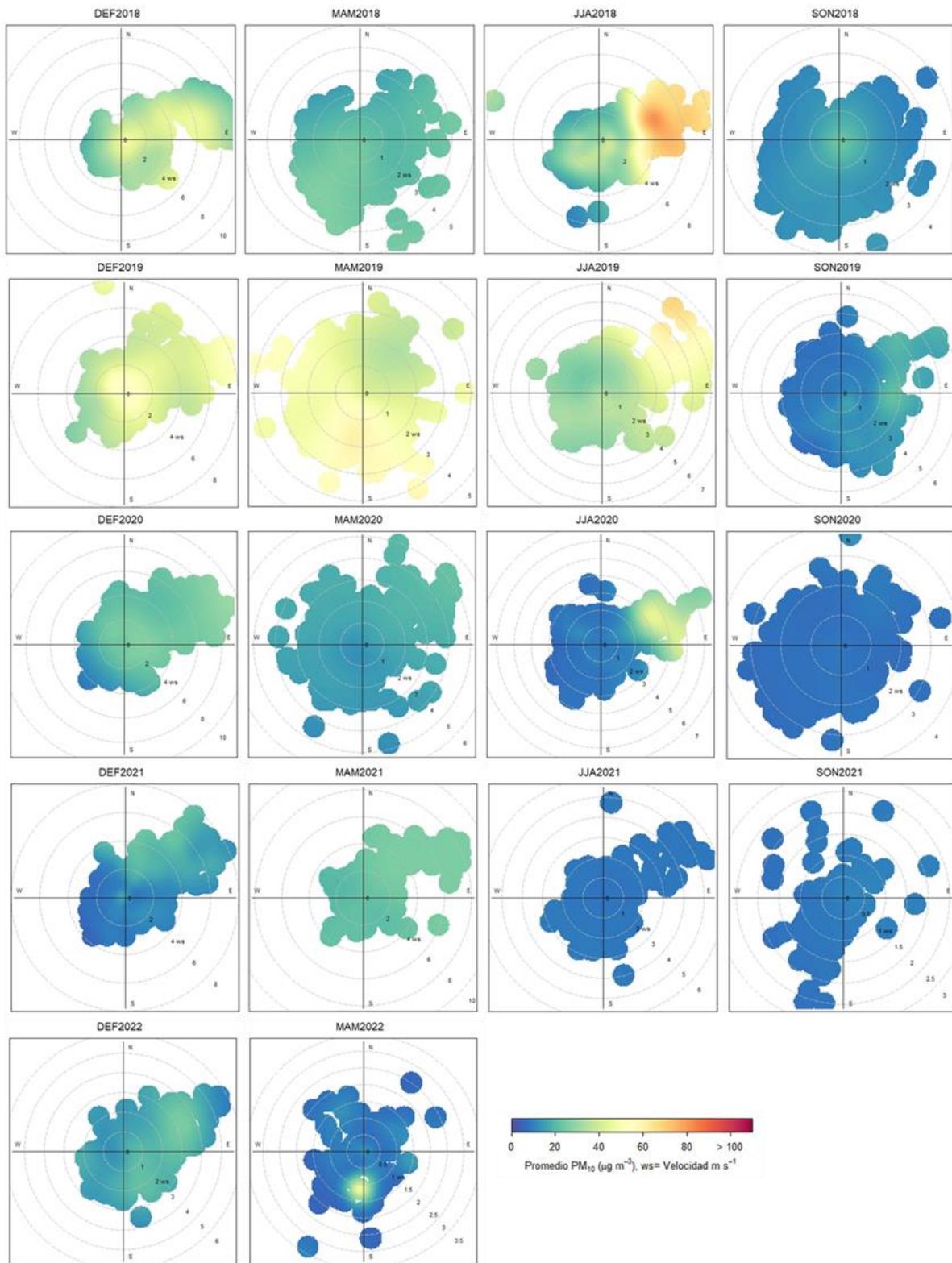


Figura 54. Rosas de contaminación por trimestre hidrológico PM<sub>10</sub>-ZM5

En la Figura 55 se muestran las rosas anuales de contaminación para las estaciones de superficie. Se aprecia que las direcciones desde donde provienen las concentraciones más altas de contaminantes permanecen constantes a lo largo de los años en la mayoría de las estaciones de monitoreo. Las variaciones más notorias se registran para la estación ZM13, estas diferencias de las direcciones con mayores concentraciones del contaminante, se relacionan con los cambios en los aportes de los vientos y la particularidad de la ubicación de este punto, el cual se encuentra rodeado de diferentes polígonos mineros. En este sentido, se sugiere que la estación ZM13 presenta aportes desde diferentes polígonos mineros, y la mayor influencia dependerá del comportamiento de los vientos durante el período de estudio con respecto a la ubicación de las minas.

En las rosas de contaminación anuales se aprecia que los puntos ZM5 y ZM6, como se analizó anteriormente, presentan las concentraciones más bajas de la zona. Lo cual se encuentra relacionado a la menor influencia de la operación carbonífera en estos puntos de monitoreo. De igual manera, se aprecia como con la evolución del tiempo se aprecia una reducción en las concentraciones reportadas para la zona, destacando que dichas reducciones se presentan durante los años bajo la influencia del fenómeno de La Niña.

Sin embargo, para la estación ZM13, y de acuerdo con resultados anteriores, se aprecia como a partir del año 2021 se presenta un aumento en los niveles del contaminante, destacando que durante estos años en mención se aprecia un cambio de direcciones en el origen de las concentraciones más altas. En este sentido, dichos incrementos pueden estar asociados a los aportes de los polígonos mineros ubicados en estas direcciones.

De igual manera, puntos de monitoreo como ZM3, ZM9 y ZM13 destacan por presentar las concentraciones más altas en la zona, donde la estación ZM13 muestra sus concentraciones más altas durante el año 2018, a diferencia de las estaciones restantes que muestran las máximas concentraciones en el 2019. En este escenario, se cataloga a ZM13 como el punto que muestra patrones y evoluciones de  $PM_{10}$  diferentes a los puntos de monitoreo restantes, lo que puede asociarse con la influencia de fuentes locales de contaminación durante el 2018, que con iniciativas de la corporación ambiental regional han ido en disminución a lo largo de los años. Así como la ubicación particular de este punto de monitoreo, rodeado por diferentes polígonos mineros en diferentes direcciones, donde dependiendo de la influencia de los vientos se modularán los principales aportes en esta estación.

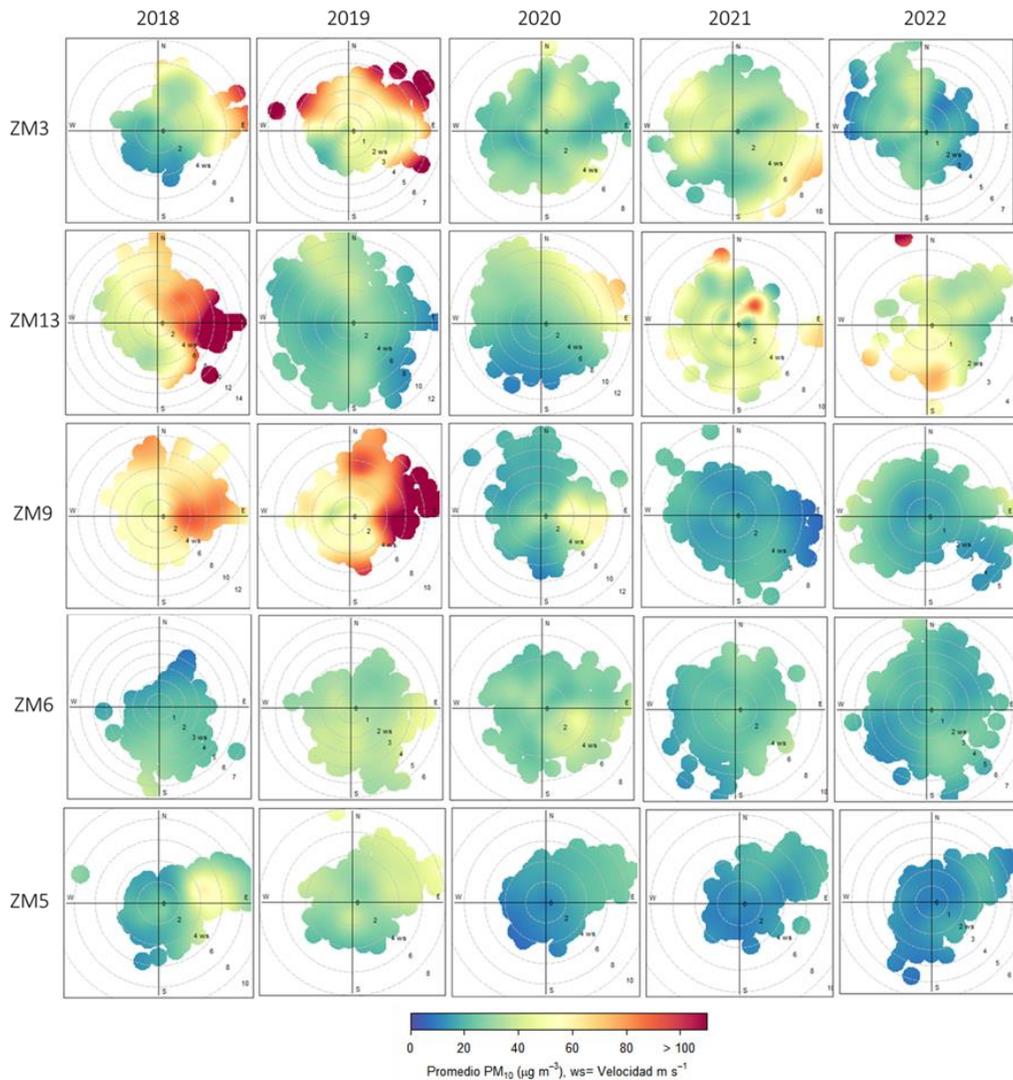


Figura 55. Rosas de contaminación anuales-PM<sub>10</sub>

Por otro lado, en la Figura 56 se presenta la matriz de correlaciones entre las variables respuesta (material particulado) y explicativas (meteorología) para ambos conjuntos de datos. La presión atmosférica no muestra una alta correlación estadística con las variables respuesta (coeficientes inferiores a 0.1), por lo cual se excluye del conjunto de variables explicativas. Lo anterior resulta coherente con lo esperado para la zona de estudio, ya que es una región plana con pocas variaciones topográficas.

Con respecto a la dirección del viento, a pesar de mostrar relaciones importantes con el registro de las concentraciones más altas de material particulado, esta variable se analiza de forma independiente con los gráficos polares presentados anteriormente. Debido a la naturaleza angular de esta variable, no fue posible la inclusión en el grupo de variables explicativas. Sin embargo, se los aportes del material particulado analizados, sugieren que provienen del mismo origen sin sufrir cambios apreciables en la fuente de emisión a lo largo del tiempo (polígonos mineros de la ZCC).

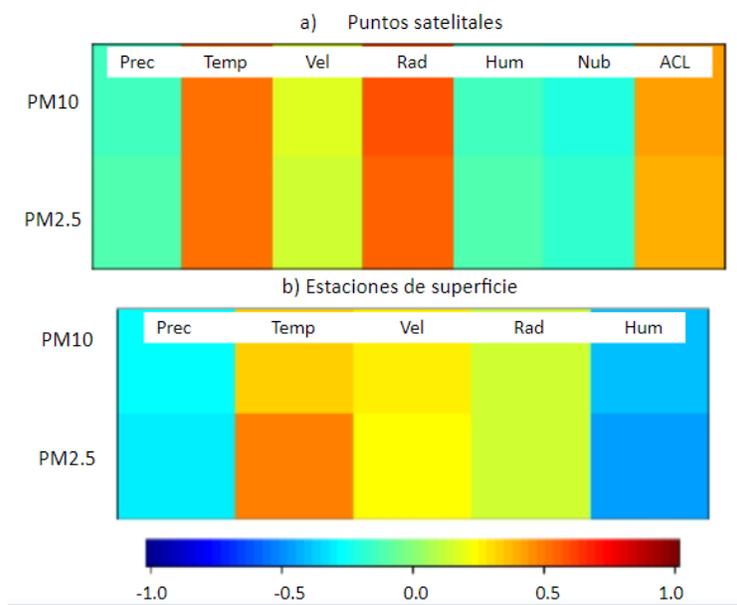


Figura 56. Matriz de correlaciones a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie

De la Figura 56 se destacan coeficientes de correlación inferiores a  $\pm 0.5$  en la totalidad de variables de interés, sin diferencias significativas entre los resultados obtenidos para material particulado de diferente tamaño de partícula. Coeficientes ligeramente más altos para temperatura y humedad relativa en el caso de PM<sub>2.5</sub> son observados. Estos resultados son consistentes con las magnitudes encontradas en otros estudios similares (Duarte et al., 2022; Nogarotto & Pozza, 2020; Rojano, Manzano, et al., 2018) y corresponden a resultados contrastantes a los obtenidos en secciones anteriores, los cuales presumían una mayor influencia de las condiciones meteorológicas en las partículas de tamaño aerodinámico inferior a 10 micrómetros.

Para la precipitación, cobertura de nubes y humedad relativa se registran relaciones inversas con las variables respuesta). Con respecto a la humedad relativa, se encuentran estudios que igualmente registran correlaciones inversas, argumentando que con un aumento suficiente en la humedad del ambiente, las partículas serán capaces de fusionarse volviéndose lo suficientemente pesadas para depositarse en el terreno (Chen et al., 2020). Una condición similar se observa para la precipitación, ya que debido a la deposición húmeda del material, durante los episodios de precipitación, se espera una disminución de los niveles de los contaminantes atmosféricos.

Con relación a la temperatura ambiente, esta corresponde a la variable explicativa de mayor correlación con los contaminantes atmosféricos, mostrando una relación directa tanto con PM<sub>10</sub> como con PM<sub>2.5</sub>. Este escenario presenta una situación opuesta a estudios que muestran correlaciones inversas de esta variable con el material particulado. Dichos estudios argumentan que un aumento de temperatura favorece al desarrollo de un régimen turbulento en las capas de la atmósfera, conduciendo a una reducción de material particulado por aumento de la dispersión vertical y/o pérdidas por compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y vapor de agua (Sridharan et al., 2021). Sin embargo, al mismo tiempo resulta ser un hallazgo consistente con un estudio similar realizado en el norte de Colombia, en una región con condiciones meteorológicas y topográficas similares a la zona de estudio (Rojano, Manzano, et al., 2018).

Algunas investigaciones asocian resultados de relaciones directas entre temperatura y material particulado con el fenómeno de inversión térmica (IT) en la atmósfera (Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2020). Este fenómeno está relacionado a distintos orígenes, por subsidencia, frontal, marina y nocturna. Sin embargo, independiente de su origen, la inversión térmica se da cuando la temperatura no cambia o incluso aumenta con la altura, de manera distinta al patrón típico de la tropósfera, lo que puede causar capas estables cerca de la superficie. Esta situación origina una interrupción en el movimiento de las masas de aire, el cual se regula por la diferencia de densidades, favoreciendo la acumulación de contaminantes en las capas más bajas al impedir la circulación vertical y alterando así la evolución del material particulado (Lozano, 2020).

Para la región de estudio, el tipo de inversión térmica más común sería la inversión térmica nocturna. Este tipo de IT ocurre durante la noche cuando la superficie de la tierra se enfría rápidamente, entonces la capa de aire más cercana al suelo se enfría más rápido que capas superiores, creando así la inversión térmica. Este tipo de efectos es común en regiones tropicales, donde durante la noche se presentan cielos despejados y bajas velocidades del viento, como las presentadas en la ZCC.

Por otra parte, para la velocidad del viento se encontró que a valores más altos se registran niveles más altos en la concentración de material particulado. Estos resultados parecieran indicar que la velocidad del viento no contribuye a un mayor efecto de la dispersión horizontal, lo cual típicamente conlleva a una disminución en los niveles del contaminante (Pacheco et al., 2020). Sin embargo, este hallazgo puede estar alineado a eventos que generan un aumento en las concentraciones de material particulado con el aumento de la velocidad. Un ejemplo de esto es el transporte desde los puntos de extracción minera hasta los puntos de monitoreo o desde fuentes lejanas. Resultados de este tipo pueden verse en las rosas de contaminación, donde a velocidades superiores a los 3 m/s se registran los niveles más altos (Ver Figura 55). Otros eventos que pueden estar aportando a estos resultados, puede ser el fenómeno meteorológico de los Vientos del Sahara que llega a afectar en la zona, así como la incidencia de los incendios forestales en la región.

El fenómeno de arenas del Sahara llega a afectar al norte de Colombia aproximadamente cada año, con mayor impacto alrededor de junio, mes en el que se reportan velocidades del viento de hasta 10 m/s y concentraciones de  $PM_{10}$  superiores a los  $100 \mu g/m^3$ . En la Figura 57 se observan episodios donde se aprecia como el transporte a larga distancia de masas de aire del Sahara llegan a afectar la zona de estudio generando un aumento de las concentraciones de material particulado durante el mes de junio a lo largo de los años dentro del período de estudio. Se aprecia que durante los episodios de los años 2018 y 2020 se registró el mayor impacto de este fenómeno para la ZCC, notando las concentraciones más altas y la trayectoria más notoria al norte de Colombia durante estos años en mención. Estos resultados son consistentes con las rosas de contaminación trimestrales presentadas anteriormente (Figura 52 a Figura 54), las cuales muestran que el período JJA del 2018 y del 2020 reportan las concentraciones más altas con respecto al mismo trimestre durante los años restantes del período de estudio.

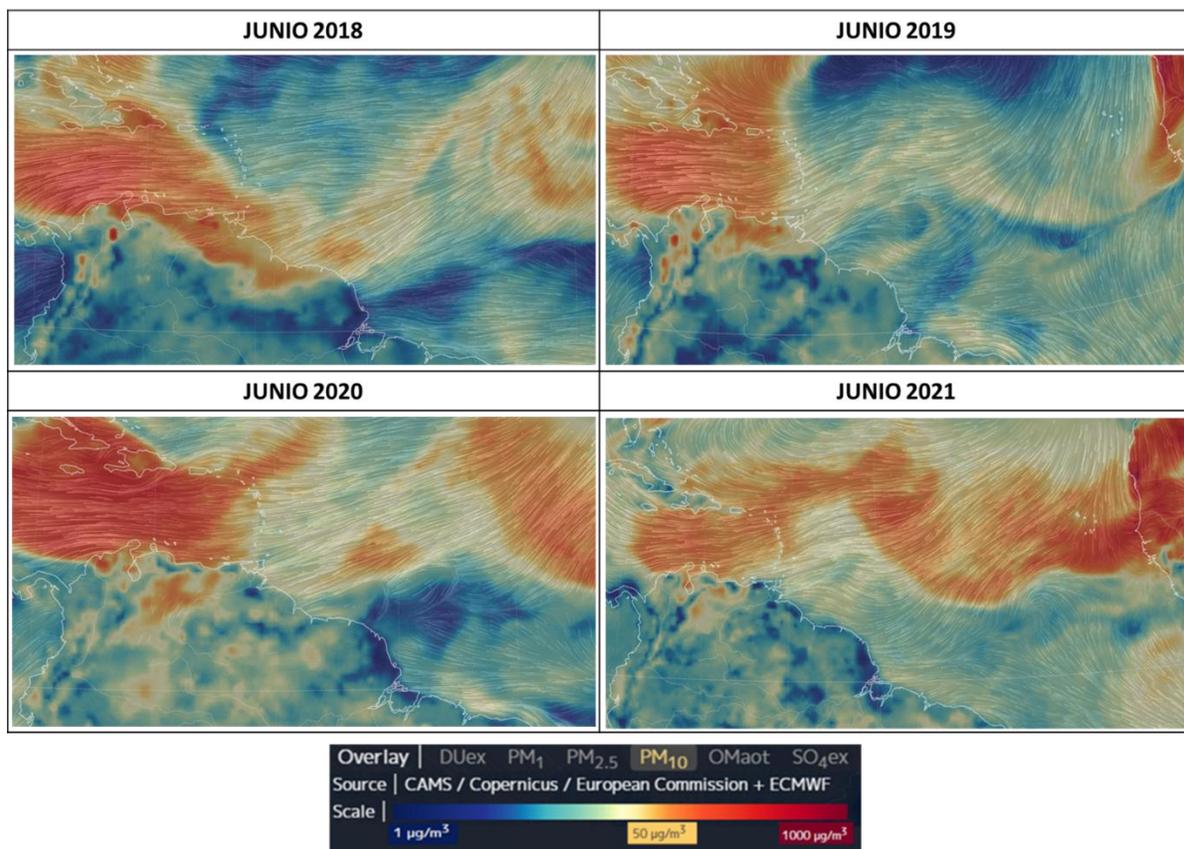


Figura 57. Mapa de concentración durante episodios de vientos del Sahara – 2018 a 2021

Por otra parte, es importante mencionar que en la ZCC los incendios forestales representan una fuente importante de material particulado, con una contribución de aproximadamente el 50%, según modelaciones de receptor realizadas. con el objetivo de estudiar los aportes de material particulado asociado con la ocurrencia de los incendios, se integraron las retrotrayectorias (trayectorias hacia atrás) con la información de puntos calientes del recurso FIRMS .

En la pantalla se presenta la evolución de las retrotrayectorias resultantes y los puntos calientes identificados para el 2020, se observa que los incendios forestales que afectan la ZCC no corresponden únicamente a incendios de origen local. Los incendios registrados al noreste de la región llegan a tener fuerte influencia en el norte de Colombia debido a los transportes de masas de aire desde estas direcciones, principalmente durante los primeros meses del año. Los trimestres DEF y MAM representan los períodos críticos en materia de registro de incendios forestales, siendo marzo el mes de mayores incendios registrados. A partir del mes de mayo las retrotrayectorias comienzan a cambiar y muestran un menor alcance, disminuyendo así las contribuciones desde el noreste de la región.

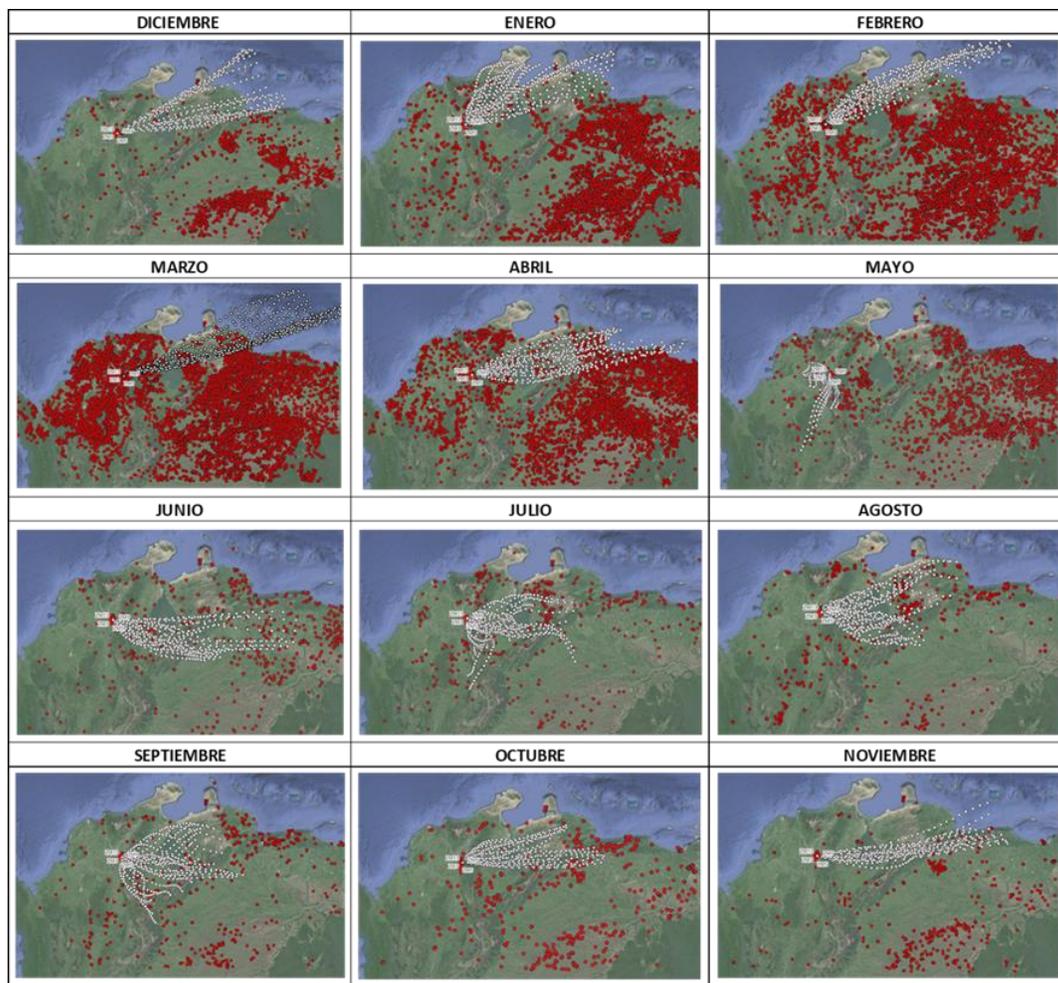


Figura 58. Puntos calientes y retrotrayectorias de masas de aire-2020

En el mismo sentido, para analizar las variaciones en las correlaciones entre material particulado y variables meteorológicas, con respecto al trimestre donde son obtenidas las mediciones, se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11 los resultados de la matriz de correlaciones discriminada por trimestre. Con respecto a la precipitación, se observa que durante los períodos de menor registro típico de lluvias, se obtienen relaciones directas entre los contaminantes y esta variable meteorológica, mientras que en los meses de mayores precipitaciones, se obtienen relaciones inversas. Este resultado se presenta debido a que durante los meses de pocas lluvias, el efecto de lavado atmosférico es inferior y existe mayor probabilidad de ocurrencia capas estables en la baja atmósfera posterior al evento de precipitación y de inversión térmica nocturna debido a los cielos despejados y el enfriamiento de suelo en estas condiciones, lo que genera un encapsulamiento de los contaminantes en la atmósfera baja.

Para la temperatura y velocidad del viento se muestran correlaciones directas con respecto al material particulado durante la mayor parte del año. Estas relaciones directas ya fueron analizadas anteriormente, destacando que durante el trimestre SON se aprecia una disminución en la magnitud de estas correlaciones, e incluso se llegan a apreciar direcciones inversas en algunos casos. Esta variación entre las relaciones reportadas para las variables analizadas, podría estar asociada a la disminución de los cielos

despejados durante los meses de septiembre-noviembre, debido al incremento de la nubosidad y las lluvias en este período sobre la región de estudio. Lo anterior, ocasiona una disminución de la inversión térmica nocturna, la cual sería la causante de las relaciones directas observadas entre el material particulado y las variables meteorológicas analizadas.

*Tabla 10. Coeficientes de correlación entre PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> y variables meteorológicas-estaciones de superficie*

Trimestre	Contaminante	Coeficiente de correlación por variable				
		Prec	Temp	Vel vie	Rad solar	Hum rel
DEF	PM <sub>10</sub>	0.02	0.18	0.25	-0.07	-0.37
	PM <sub>2.5</sub>	0.01	0.34	0.21	-0.07	-0.36
MAM	PM <sub>10</sub>	-0.2	0.23	0.17	0.07	-0.29
	PM <sub>2.5</sub>	-0.27	0.44	0.26	0.07	-0.47
JJA	PM <sub>10</sub>	-0.17	0.34	0.13	-0.11	-0.3
	PM <sub>2.5</sub>	-0.11	0.4	0.07	-0.15	-0.3
SON	PM <sub>10</sub>	-0.11	-0.09	0.32	-0.03	0.15
	PM <sub>2.5</sub>	-0.25	0.11	0.13	-0.16	0.05

Con respecto a la variable de altura de capa límite (CLA), se observa en la Tabla 11 que la magnitud de la relación es de las más altas, superada únicamente por la temperatura y la radiación solar. Sin embargo, se observan diferentes direcciones de la relación dependiendo del trimestre analizado. Durante DEF y MAM el coeficiente de correlación tiene una influencia directa con el material particulado, mientras que direcciones inversas se exhiben en JJA y SON.

Las relaciones inversas reportadas entre la altura de capa límite y el material particulado, son consistentes con estudios que argumentan que a mayor altura de la capa se presenta mayor mezcla vertical y por lo tanto una disminución de los niveles de contaminantes al aumentar la dispersión de los mismos (Ramírez, 2022). Por el contrario, para las relaciones directas obtenidas durante DEF y MAM, se sugiere que a pesar de las condiciones termodinámicas favorables registradas, el material particulado tiende a aumentar sus niveles. Esta situación atípica puede estar relacionada con un mayor aporte de los incendios forestales para esta región del país durante esta época del año.

Una condición particular se evidencia para la radiación solar, ya que esta variable muestra una de las contribuciones más altas en el conjunto de datos satelitales durante algunos trimestres (los que registran mayor incidencia de radiación solar), pero en las estaciones de superficie se reportan coeficientes de correlación bajos de forma sostenida en todo el año. De los puntos satelitales se observa que durante los primeros meses del año, se aprecian las relaciones directas más fuertes, mientras que en el segundo semestre se evidencia una disminución en la fuerza de estas relaciones directas, e incluso durante el trimestre JJA se exhibe un cambio de dirección, mostrando relaciones inversas con respecto a las concentraciones de material particulado. Las relaciones directas obtenidas en la radiación solar no corresponden a los resultados esperados para esta variable, ya que se presumía que a mayor radiación solar se generaba mayor mezcla turbulenta en la atmósfera, que ocasiona una mayor dispersión de los contaminantes. Sin embargo, de manera equivalente a la variable CLA, se sugiere que la influencia de los incendios forestales durante los primeros meses del año, influye de manera directa en los resultados obtenidos, actuando como una variable interferencia en los resultados.

En este sentido, el efecto positivo de las variables meteorológicas involucradas en la turbulencia de la atmósfera, se está viendo enmascarado por las consecuencias de los incendios forestales locales y regionales. Destacando que la influencia de estos eventos no es despreciable y debe ser analizada a detalle para la zona de estudio.

*Tabla 11. Coeficientes de correlación entre PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub> y variables meteorológicas- puntos satelitales*

Trimestre	Contaminante	Coeficiente de correlación por variable						
		Prec	Temp	Vel vie	Rad solar	Hum rel	Cob nub	CLA
DEF	PM <sub>10</sub>	0.02	0.55	0.29	0.65	-0.27	-0.23	0.46
	PM <sub>2.5</sub>	0.02	0.54	0.29	0.65	-0.28	-0.23	0.46
MAM	PM <sub>10</sub>	-0.56	0.6	0.59	0.76	-0.43	-0.81	0.68
	PM <sub>2.5</sub>	-0.54	0.6	0.57	0.74	-0.42	-0.79	0.67
JJA	PM <sub>10</sub>	0.09	0.08	0.33	-0.08	-0.5	0.2	-0.24
	PM <sub>2.5</sub>	0.09	0.08	0.31	-0.16	-0.52	0.21	-0.26
SON	PM <sub>10</sub>	-0.38	0.45	-0.2	0.36	0.29	0.31	-0.25
	PM <sub>2.5</sub>	-0.34	0.42	-0.21	0.37	0.26	0.28	-0.22

En este escenario, se implementó el análisis de correspondencias canónicas (ACC) para explorar las interacciones lineales entre las variables explicativas y variables respuesta. Para este caso, utilizamos ACC para explorar cómo las variables meteorológicas se relacionan con los niveles de los contaminantes atmosféricos. Esta técnica permite maximizar la correlación entre las matrices de variables, identificando patrones significativos y proporcionando coeficientes canónicos que expresan estas relaciones. Un coeficiente canónico es un “peso” asignado a cada variable en las funciones resultantes. Estas funciones son combinaciones lineales de las variables respuesta originales que se construyen de acuerdo con la maximización de las correlaciones.

Es importante destacar que los coeficientes canónicos presentados en la Figura 59 son valores estandarizados. Al estandarizarlos, se los ajusta para que tengan una desviación estándar de 1, lo que facilita la comparación de la magnitud de los efectos entre variables con escalas diferentes, lo que es especialmente útil cuando las variables tienen unidades de medida y magnitudes diferentes. De los coeficientes obtenidos, se destaca que la variable cobertura de nubes muestra tener una magnitud superior a la de precipitación en el conjunto de relaciones maximizadas, lo cual podría estar relacionado con la influencia de esta variable con la ocurrencia o no de inversión térmica nocturna en la zona y su afectación sobre la radiación solar incidente y el transporte de contaminantes emitidos desde la superficie.

De igual manera, se confirma que la radiación solar a pesar de presentar comportamiento en la misma dirección del material particulado, no supone una alta importancia relativa con respecto a la variabilidad de los contaminantes atmosféricos en la totalidad del período analizado. Sin embargo, de acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 11, se observa que la relación de la radiación solar llega a ser significativa únicamente durante los primeros meses del año, los cuales corresponden al período con mayor incidencia de radiación solar en la zona. En cuanto a la temperatura y velocidad del viento, estas variables muestran una fuerte correlación con respecto a PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, notando que los coeficientes canónicos muestran las magnitudes más altas para estas variables en mención.

Por otra parte, los conjuntos de las combinaciones lineales resultantes son significativos ( $>0.5$ ). Para el conjunto de datos satelitales se observan redundancias de hasta 0.94 entre la capacidad predictora de las variables meteorológicas sobre el material particulado, destacando que dicha redundancia no se registra en el conjunto de estaciones de superficie. Lo anterior sugiere que esta redundancia está directamente relacionada con la altura de capa límite, sustentado de igual manera a su alta interdependencia con respecto a las variables meteorológicas restantes.

a)

```
> canon$cor
[1] 0.7575682 0.5395016
> canon$xcoef
      [,1]      [,2]
Prec    0.006330504 -0.001541214
Temp    0.204271691 -0.081470886
Vel.vie -2.005124474 -0.101211538
Rad.solar 0.014851625 -0.026414275
Hum.rel  0.029894481 -0.034010652
Cob.nubes -3.246064787 -5.108100474
CLA      0.004817006 -0.002927942
> canon$ycoef
      [,1]      [,2]
PM10  0.5147926  0.6784944
PM25 -0.6174176 -0.9436276
```

b)

```
> canon$cor
[1] 0.5222059 0.2165522
> canon$xcoef
      [,1]      [,2]
Prec   -0.001457277 -0.003441289
Temp    0.620979779 -0.899442318
Vel.vie  0.190897639  0.528300265
Rad.solar -0.012284731  0.018015070
Hum.rel -0.031966866 -0.069956070
> canon$ycoef
      [,1]      [,2]
PM10 -0.008316884  0.08985297
PM25  0.179046166 -0.20670830
```

Figura 59. Coeficientes canónicos estandarizados ACC a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie

En la Figura 60 se muestran las direcciones de las relaciones entre las variables respuesta y explicativas, notando que entre ambos contaminantes se muestra un patrón muy similar. Lo anterior, resulta esperable debido a la naturaleza de los mismos y a resultados previamente presentados. Las variables de cobertura de nubes, precipitación y humedad demuestran tener una relación similar entre ellas y por el contrario, una relación inversa con las variables restantes, incluyendo variables respuesta y explicativas

Se resalta a variables como temperatura, altura de capa límite, radiación solar y velocidad del viento como las condiciones que se comportan en la misma dirección de las variables respuesta, es decir, que mayor magnitud de las mismas se presentarán concentraciones más altas de material particulado, siendo la temperatura y la velocidad del viento las principales moduladoras de la calidad del aire en la zona.

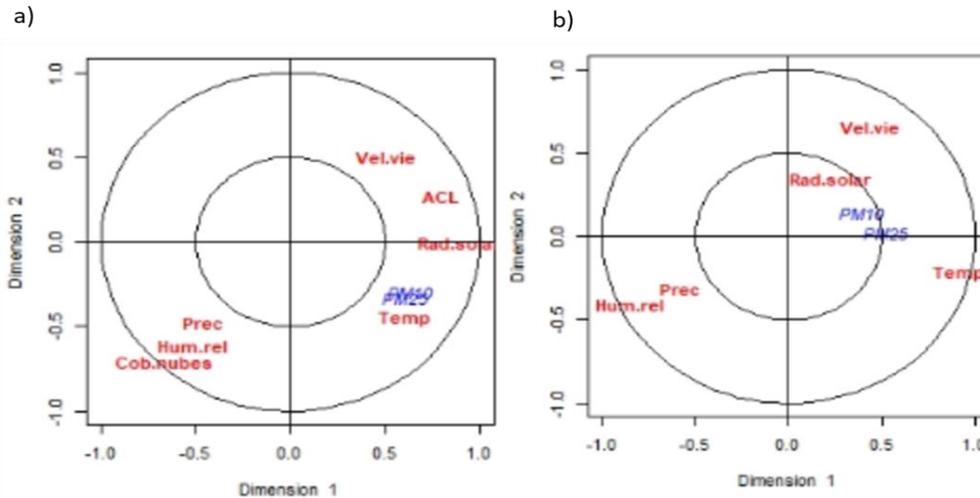


Figura 60. Biplot del análisis de correspondencias canónicas a) Puntos satelitales b) Estaciones de superficie

En general para la escala anual, los efectos de la meteorología sobre la dinámica del material particulado, muestran relaciones inversamente proporcionales para precipitación, humedad relativa y cobertura de nubes. Estos resultados se encuentran asociados a efectos como deposición húmeda en la zona. Mientras que variables como temperatura, radiación solar, velocidad del viento y altura de capa límite, presentan relaciones directas, las cuales se asocian a la ocurrencia de fenómenos como la inversión térmica nocturna, los vientos del Sahara y la incidencia de incendios forestales locales y regionales. Se resalta que dependiendo del trimestre del año analizado, dichos resultados pueden registrar variaciones tanto en dirección como en magnitud. Estas variaciones registradas se asocian directamente con las características meteorológicas de cada período, las cuales influyen en las relaciones obtenidas con respecto al material particulado.

### 3.3.2 Ciclo diario

En la Figura 61 y Figura 62 se presentan los efectos de las condiciones meteorológicas sobre el ciclo diario del contaminante  $PM_{10}$ . En la escala diurna la influencia de todas las variables meteorológicas presentadas en la imagen, con excepción de la humedad relativa, es inversamente proporcional a los niveles del contaminante registrados, situación relacionada con los aportes de las variables en mención sobre el desarrollo del régimen turbulento en la atmósfera.

Estos resultados obtenidos en la escala diurna, registran un comportamiento diferente al obtenido para las mismas variables meteorológicas en la escala anual, y las diferencias responden tanto a la dinámica dentro de cada escala de interés como a la incidencia de variables interferencia dentro del ciclo anual.

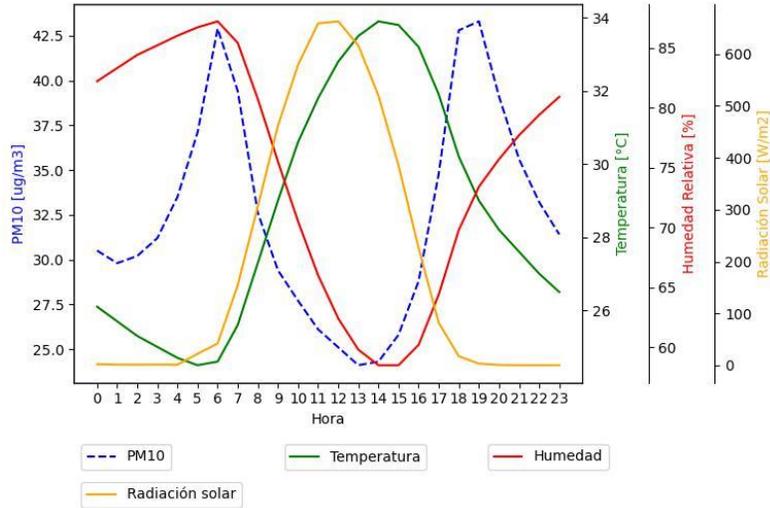


Figura 61. Efecto de las condiciones meteorológicas en la evolución diaria del MP-Estaciones de superficie

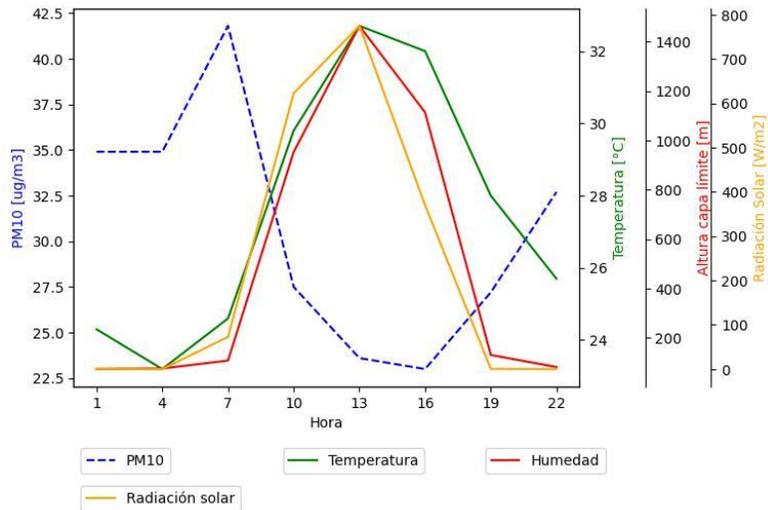


Figura 62. Efecto de las condiciones meteorológicas en la evolución diaria del MP-Puntos satelitales

Buscando profundizar el análisis, para explorar las relaciones de la precipitación en el ciclo diario de los contaminantes atmosféricos. Se presenta en las Figura 63 y Figura 64 la discriminación de las concentraciones del material particulado dependiendo de la intensidad de las precipitaciones registradas durante su reporte.

Se aprecia de forma general, que las lluvias superiores a los 2 mm/hora (identificadas en color naranja), presentan las concentraciones más bajas de los contaminantes, mientras que las lluvias de menor intensidad muestran mayores frecuencias para los niveles más altos de material particulado.

Con respecto a la incidencia del horario de registro de precipitaciones en los niveles de los contaminantes, se observa que para las lluvias de menor intensidad se reportan mayores niveles de material particulado durante el horario nocturno. Sin embargo, para las lluvias con intensidad superior a los 2 mm/hora no se

evidencia dicho efecto. Lo anterior permite suponer que si las lluvias registradas son de baja intensidad, se tendrá una mayor deposición húmeda durante el horario diurno.

Estos resultados son consistentes con las relaciones analizadas anteriormente, que argumentan la ocurrencia de inversión térmica nocturna, que disminuye el lavado atmosférico por efecto de la precipitación en las horas con ausencia de luz solar, a menos que se presenten precipitaciones lo suficientemente fuertes para superar este efecto. Las lluvias fuertes pueden llegar a agitar y mezclar las capas de la atmósfera, ayudando a romper la inversión térmica al mezclar aire más cálido en altitudes más bajas con aire más frío en altitudes más altas.

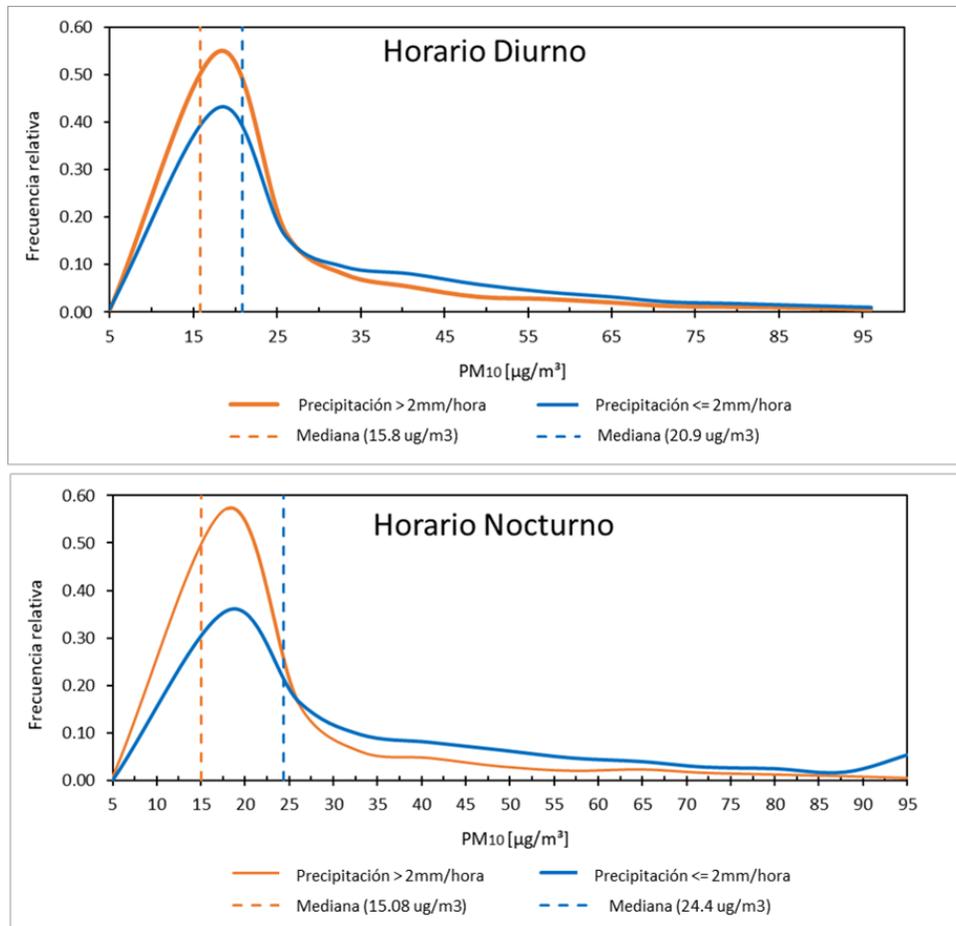


Figura 63. Efecto de la precipitación en las concentraciones horarias de  $\text{PM}_{10}$  en estaciones de superficie (Horario diurno y nocturno)

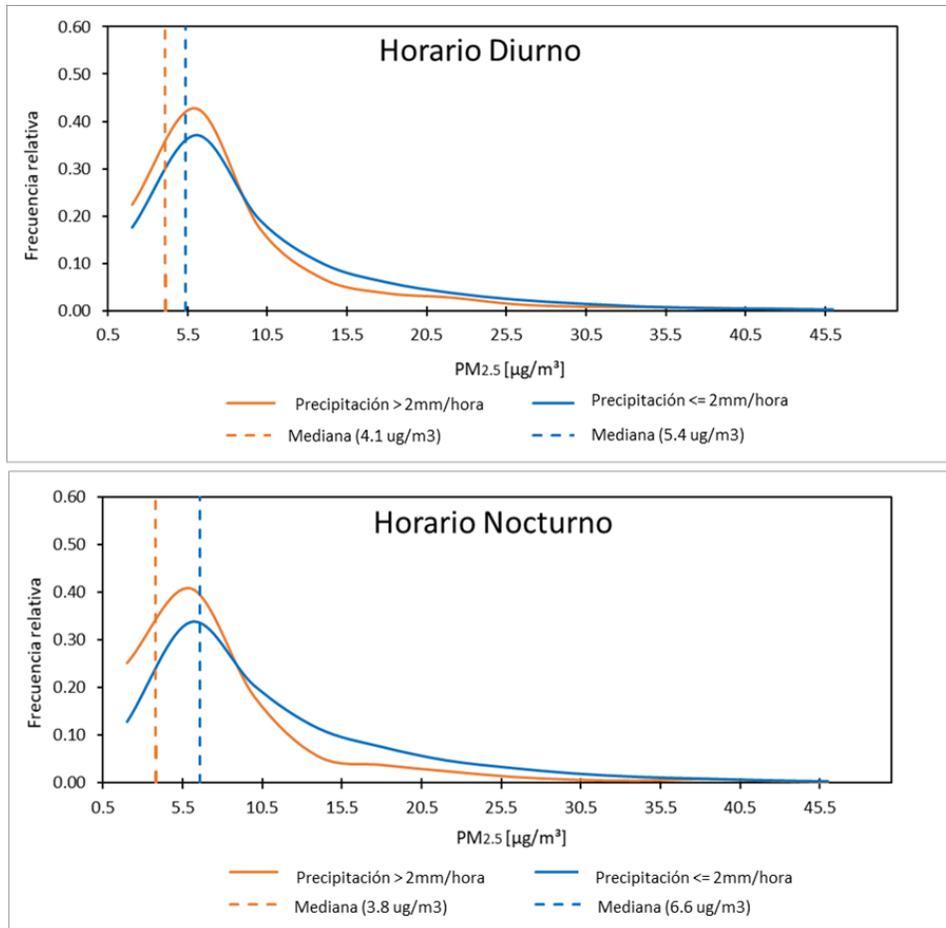


Figura 64. Efecto de la precipitación en las concentraciones horarias de  $PM_{2.5}$  en estaciones de superficie (Horario diurno y nocturno)

Adicionalmente, se realizaron los anillos de contaminación, que permiten analizar la evolución de los contaminantes a través de las horas del día y teniendo en cuenta las direcciones de los aportes. Dichos gráficos fueron realizados por trimestre, como se muestra en la Figura 65, con el fin de identificar la evolución de los contaminantes a través de cada período y realizar la comparación de los patrones interanuales observados.

De manera general, los anillos de contaminación muestran concentraciones de  $PM_{10}$  alrededor de los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que se presentan de manera homogénea desde todas las direcciones. Además, se observan mayores valores principalmente en el interior y exterior de los anillos de contaminación, es decir en las primeras y últimas horas del día. Los trimestres JJA y SON se destacan como los períodos donde la distribución de las concentraciones registran un comportamiento más homogéneo durante el día y entre los años del período. Por otro lado, durante el trimestre DEF se aprecian las concentraciones más altas. En particular, a lo largo de los años los niveles más altos se concentran durante las primeras horas del día con el pico más alto a las 08:00 h y posteriormente un incremento desde las 16:00 h hasta las últimas horas del día.

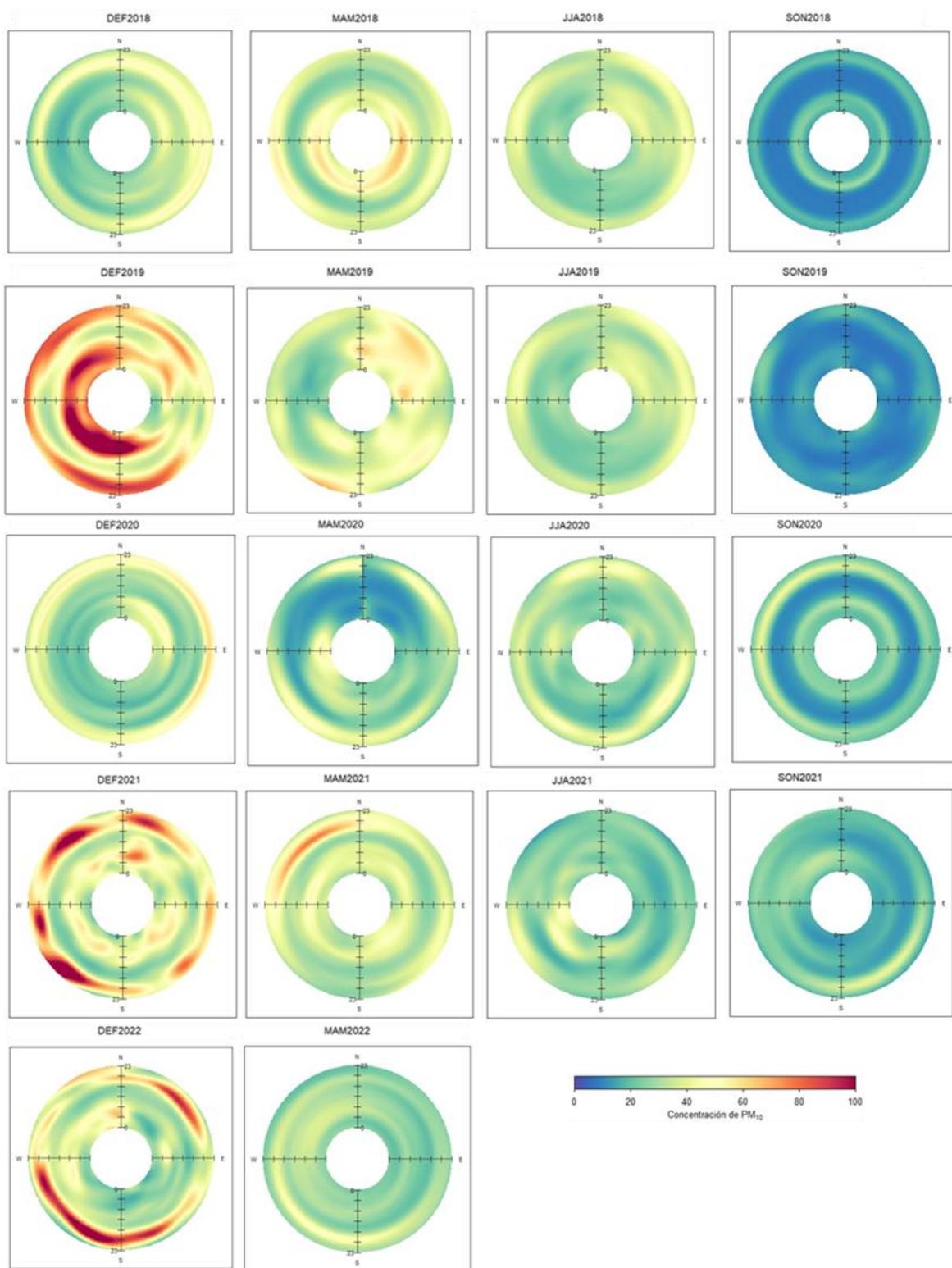


Figura 65. Anillos de contaminación por trimestre hidrológico PM<sub>10</sub>-ZM3

Finalmente, para analizar el impacto de las condiciones meteorológicas sobre los patrones regionales de transporte del material particulado, se calcularon las trayectorias adelantadas durante cada trimestre. Las trayectorias fueron calculadas diariamente durante intervalos de 3 horas. Se presentan en la Figura 66 los resultados para el año 2020, destacando patrones y tendencias consistentes durante todos los años del período analizado.

Los resultados sugieren que las comunidades más propensas a ser afectadas por la distribución de contaminantes desde la ZCC, son aquellas ubicadas entre el noroeste y suroeste, direcciones consistentes con aquellas reportadas como impacto potencial del PST y PM<sub>10</sub> proveniente de la mina Cerrejón en la Guajira (Rojano, Manzano, et al., 2018).

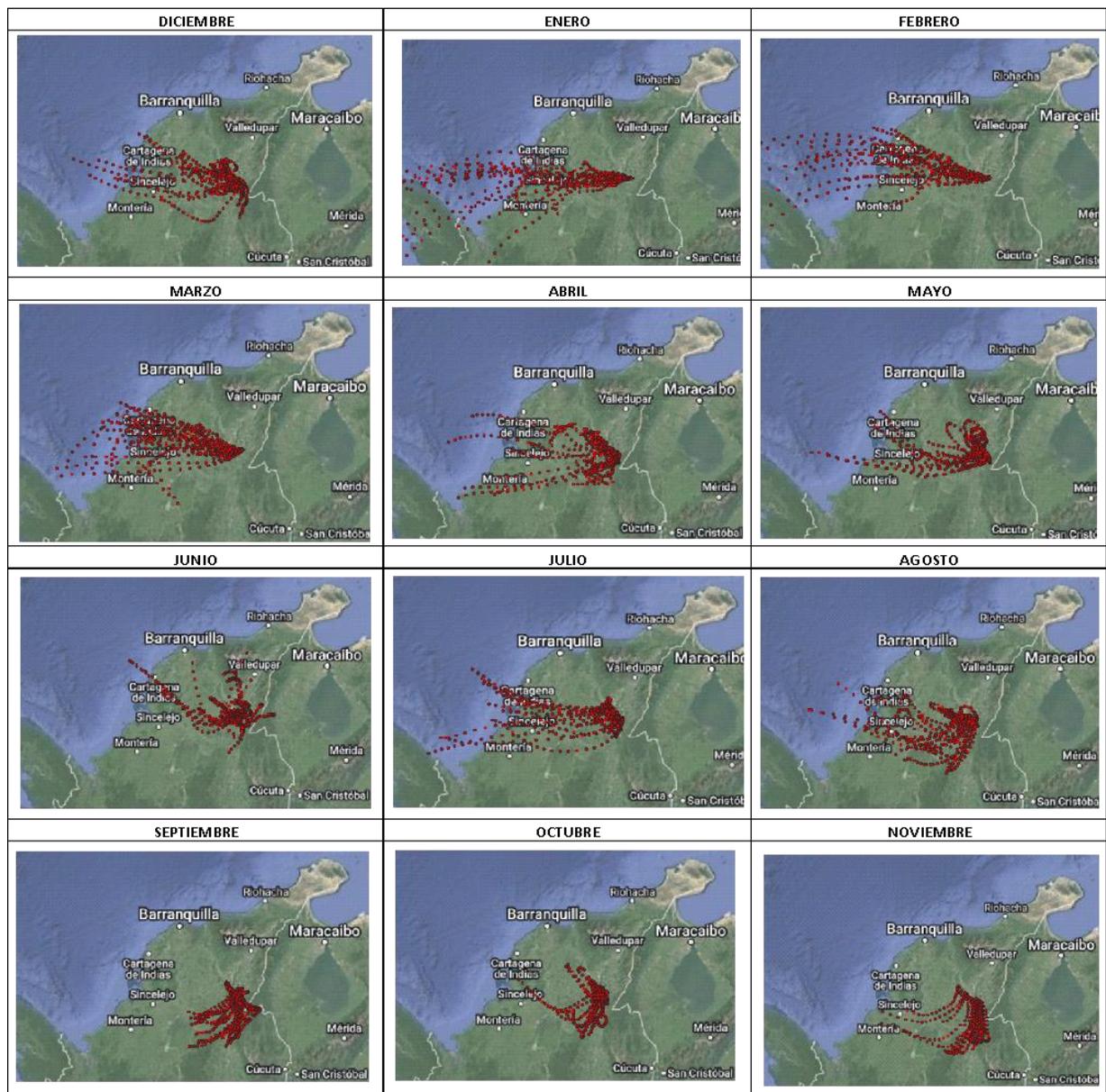


Figura 66. Trayectorias adelantadas de masas de aire- 2020

Se resalta que se identificaron diferencias entre los alcances reportados en los patrones de transporte analizados durante cada trimestre. Durante DEF se notan las trayectorias de mayor alcance que logran afectar comunidades ubicadas a una mayor distancia desde el origen del material particulado (ZCC). Un escenario opuesto se observa durante SON, notando que los alcances de las trayectorias de masas de aire durante estos meses, reducen sustancialmente el alcance e impacto regional.

Las variaciones en el alcance de los contaminantes atmosféricos, se puede relacionar con la ubicación de la ZCIT durante épocas en particular. Durante el trimestre DEF, la ZCIT aún se encuentra al sur del país, por lo cual el transporte regional no se encuentra limitado por estas franjas de bajas presiones, logrando un alcance mayor en la trayectoria del material particulado, impactando comunidades aledañas como Panamá. Por otro lado, durante SON, típicamente la ZCIT está en su proceso de migración desde la región al norte del país, por lo que el transporte regional se ve afectado.

Con respecto a las relaciones observadas en el ciclo diurno entre variables meteorológicas y material particulado, se destaca que son de similar magnitud a las notadas para el ciclo anual pero de direcciones opuestas en algunos casos. Para temperatura, radiación solar, altura de capa límite y velocidad del viento, se observan relaciones inversas con los contaminantes atmosféricos. Estas relaciones son consistentes con resultados de estudios previamente mencionados, donde soportan dichos hallazgos con el aumento en la dispersión vertical por la turbulencia de la atmósfera, aumento en la dispersión horizontal por mayor velocidad en los vientos y/o pérdidas en el MP por compuestos orgánicos volátiles, semivolátiles y vapor de agua (Pacheco et al., 2020; Sridharan et al., 2021).

De manera equivalente, variables como humedad relativa y precipitación que presentaban relaciones inversas en la escala anual, muestran relaciones opuestas (directas) para el ciclo diurno. Notando en el caso de la precipitación que existe un efecto diferenciado de acuerdo a si ocurre en horas con presencia o ausencia de luz solar. En este sentido, se aprecia que las precipitaciones registradas durante el horario diurno tienen una mayor eficiencia en la disminución de los contaminantes, resultados que no son consistentes con investigaciones que afirman que la eficiencia del lavado atmosférico es mayor durante el horario nocturno (Roldán-Henao et al., 2020; Wang & He, 2020). Sin embargo, es importante considerar que estas relaciones pueden variar de acuerdo con factores locales de la región de estudio. Por ejemplo, en la ZCC se presume que la disminución del material particulado es más eficiente durante las precipitaciones registradas durante el día, debido a la mayor influencia de la mezcla vertical del aire en horas con radiación solar, mientras que durante la noche, la formación de nubes en la troposfera baja induce a la estabilidad que limita la dispersión de los contaminantes atmosféricos o incluso a la inversión térmica, favoreciendo la acumulación de los mismos (Ramírez, 2022).

### **3.4 Posibles estrategias de control y mitigación de la contaminación atmosférica.**

En el marco mundial de cambio climático, transición energética y neutralidad de carbono, Colombia deberá asumir el reto de expandirse en nuevos mercados, como un competidor con altos estándares tecnológicos, ambientales y sociales. Los impactos socioambientales de las zonas mineras han sido ampliamente estudiados, sin embargo, para regiones como la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) aún es necesario entender en mayor detalle el alcance de estos impactos, así como las zonas más vulnerables.

En esta región, el carbón juega un papel predominante en la economía y en las dinámicas poblacionales locales. Además, su extracción seguirá aportando a la seguridad energética, social y económica a nivel

nacional y global, al menos en el corto y mediano plazo. En este sentido, estudios como este proporcionan herramientas de análisis del alcance de los impactos de este tipo de minería en la región y fortalece las instituciones para apostar a una minería de carbón en la región competitiva, legal y sostenible con el ambiente y las comunidades aledañas.

Este trabajo de investigación ofrece evidencias del alcance regional de los contaminantes emitidos desde la ZCC, mediante un análisis del papel de la meteorología en los procesos de transporte y deposición de los mismos, y aunque no se realiza un estudio de impactos sobre la salud, sí permite inferir acerca de poblaciones que pueden ser afectadas. Con base en los resultados, se presentan algunas consideraciones que pueden tenerse en cuenta al momento de realizar una reestructuración de las medidas de seguimiento, control y mitigación en el país, específicamente en la ZCC.

-Las dinámicas meteorológicas a lo largo del año pueden tener un impacto significativo en los niveles de los contaminantes atmosféricos. Los resultados obtenidos sugieren que estas dinámicas se consideren en los estudios de calidad del aire y en el diseño de normativas, pues afectan las condiciones de transporte y concentración de contaminantes del aire en la región. En este sentido, la normativa de los contaminantes para la ZCC podría involucrar análisis de las condiciones meteorológicas y ser ajustable dependiendo de la temporada del año y las condiciones de transporte regional de los contaminantes. Por ejemplo, los límites permisibles de emisiones de MP desde los desarrollos mineros podrían ajustarse en meses de condiciones más o menos favorables y así apuntar a unos niveles de concentración aceptables usando como referencia guías como la resolución 2254 del 2017 y los lineamientos dados por la OMS.

-Incluir en los reportes de media móvil una comparación con el índice ONI proporciona herramientas de análisis y de toma de decisiones en la escala interanual, pues como se mostró en este trabajo, existe un efecto del ENSO, tanto en su fase cálida —El Niño— como en su fase fría —La Niña—, en los procesos de transporte y por lo tanto en la concentración de contaminantes en la región. Esto puede permitir evaluar en mayor detalle las relaciones entre el ENSO y la calidad del aire en la región.

-El pronóstico de condiciones meteorológicas adversas para el transporte de contaminantes que favorezcan la acumulación de contaminantes atmosféricos, como baja altura de capa límite, formación de capas estables o de inversión térmica, o limitación del transporte por cuenta de los frentes de circulación, pueden dar lugar a alertas de calidad del aire que restrinjan temporalmente las emisiones desde las fuentes, la reducción de la producción o del transporte industrial y/o doméstico.

-Algunas opciones de mitigación pueden requerir medidas específicas durante ciertas épocas del año, cuando las condiciones meteorológicas adversas puedan agravar la contaminación del aire. Por ejemplo, durante los meses de mayor incidencia de incendios forestales en la ZCC se debe considerar el efecto de estos aportes exógenos en las medidas de control que se tomen en la región. En este escenario, se necesita inversión en el desarrollo de proyectos de investigación encaminados al control de las emisiones en la ZCC que consideren el efecto mencionado inicialmente respecto a medidas específicas debido a condiciones adversas. Con respecto a la etapa de voladura se deben direccionar esfuerzos con base al impacto de la meteorología para determinar los métodos de control necesarios para cada época del año o del día, teniendo en cuenta que existirán en algunos casos tecnologías más efectivas que disminuyen las emisiones fugitivas pero que requieren de mayores recursos y por lo tanto no será posible la implementación continua de las mismas.

-De igual manera, debido a la infraestructura de las vías sin pavimentar por donde circulan vehículos pesados para el transporte de mineral y material inerte en la zona, las actividades de riego de vías y el uso de pulverizadores de microgotas de agua, son herramientas importantes ya que disminuyen las emisiones de MP con la humectación de las vías o permiten el atrapamiento y depósito del material con el uso de pulverizadores. En este sentido, resulta pertinente desarrollar un método que permita determinar la frecuencia de los vehículos de riego, las horas preferibles para ello, y la necesidad de la implementación de un refuerzo con pulverizadores de agua, teniendo en cuenta las variaciones de las condiciones meteorológicas durante el día para una optimización de recursos que permita de igual manera un control de polvo efectivo. Este método se debe desarrollar de preferencia con mapeos de polvo e información de calidad del aire y meteorología en tiempo real, o inicialmente realizar los cálculos por temporadas específicas con base en pronósticos meteorológicos.

-Al identificar la procedencia de los principales aportes por contaminación regional, se deberá velar por la comunicación de los hallazgos y la creación de mesas de trabajo para evaluar de manera conjunta posibles alternativas de mitigación, principalmente en las temporadas de mayores aportes.

-Este trabajo proporciona información del transporte de contaminantes en la región que permite inferir poblaciones que pueden verse afectadas. Estudios de impactos sobre la salud y vulnerabilidad deben desarrollarse con el fin de establecer el efecto real de los procesos de minería sobre los habitantes de la región y posible impacto en comunidades aledañas. Investigaciones enfocadas a enfermedades como la neumoconiosis deben ser promovidas ya que se considera un problema de salud pública al ser una enfermedad crónica, irreversible y tener prevalencia demostrada en trabajadores de minas de carbón (Varona et al., 2018 ).

Adicionalmente, estudios previos (Orozco et al., 2020) muestran que el tiempo de exposición para el desarrollo de la enfermedad, que se reportaba debía ser superior a 25 años, puede verse reducido debido a altas concentraciones de agentes contaminantes en la atmósfera. Por lo anterior, podría llegar a contemplar a trabajadores en edades más tempranas, e incluso en zonas de alta contaminación se debería analizar la afectación a población sensible que habite por fuera del polígono minero.

#### **4. Conclusiones**

Las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  registradas en la Zona Carbonífera del Cesar (ZCC), superaron en la totalidad del período de estudio (2018-2022) los límites internacionales recomendados por la OMS para los promedios diarios y anuales. Sin embargo, los estándares nacionales de calidad del aire, como la resolución 2254 del 2017, resultan ser muy permisibles con respecto a los límites recomendados por la OMS. Lo anterior demuestra la necesidad de reevaluar las regulaciones ambientales colombianas y la manera de realizar seguimiento y control a la calidad del aire del país, principalmente en zonas de alta concentración de contaminantes como la ZCC.

La evolución de material particulado durante el período de estudio mostró variaciones en sus escalas anuales, diarias, así como entre puntos de monitoreo. Dichas variaciones se relacionan tanto con la variabilidad de las condiciones meteorológicas como con la ubicación geográfica del punto de monitoreo, especialmente criterios de microlocalización como cercanía a formaciones montañosas y a las fuentes generadoras de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Sin embargo, los análisis sugieren fuentes comunes para ambos contaminantes, que se asocia con los polígonos mineros de la zona de estudio.

Las condiciones meteorológicas mostraron no tener diferencias estadísticamente significativas con respecto a condiciones espaciales en la zona de estudio, pero se resaltan algunas diferencias para los reportes de variables meteorológicas entre las estaciones de monitoreo. Para las estaciones que están más alejadas de las formaciones montañosas de la región de estudio, se registran en promedio las temperaturas más altas y la velocidad del viento tiene un comportamiento bimodal más marcado en el ciclo anual. Mientras que las estaciones más cercanas a las formaciones montañosas, presentan en promedio los mayores picos de precipitación durante todo el año.

Con respecto a diferencias estacionales, se registran diferencias significativas entre las condiciones meteorológicas registradas durante los primeros trimestres del año (DEF y MAM) con respecto a los meses restantes. Durante DEF y MAM se presentan los valores más altos de temperatura, radiación solar y velocidad del viento, lo cual a su vez genera mayor turbulencia en la atmósfera obteniendo mayores alturas de capa límite. Mientras que estas variables registran los valores más bajos durante SON, y adicionalmente la precipitación muestra un régimen bimodal con las lluvias más fuertes durante septiembre-noviembre.

Las diferencias en el comportamiento del ciclo anual para las variables meteorológicas en la región de estudio, está significativamente influenciado con la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que afecta diferentes regiones del país en diferentes momentos del año. Durante el trimestre septiembre-noviembre, típicamente la ZCIT está en su proceso de migración desde la región norte del país, donde se encuentra a mitad de año, permitiendo así que aire húmedo llegue a la zona y ocasione mayor cantidad de eventos de precipitación con respecto a otros períodos del año. Contrario al escenario registrado en diciembre-febrero, cuando la ZCIT se encuentra en el extremo sur del país y las condiciones son más secas y con velocidades del viento y radiación solar más altas.

De igual manera, el impacto regional de las concentraciones de material particulado muestra una relación con respecto a la posición de la ZCIT en la región. Entre diciembre-febrero la ZCIT aún se encuentra al sur del país, por lo cual el transporte regional no se encuentra limitado por estas franjas de bajas presiones, logrando un alcance mayor en la trayectoria del material particulado. Por otro lado, durante SON el transporte regional se ve afectado debido a la limitación de la banda de bajas presiones que trae la ZCIT en su proceso de migración desde el norte del país, notando una influencia concentrada de los contaminantes atmosféricos provenientes de la ZCC hacia el centro de Colombia. Durante los meses restantes, se observan trayectorias de masas de aire similares con alcances regionales que afectan principalmente a Panamá y comunidades aledañas.

Con respecto a las relaciones entre meteorología y calidad del aire, no se encontraron diferencias significativas en los resultados obtenidos para los contaminantes atmosféricos analizados, notando influencias en la misma dirección y magnitudes similares tanto para  $PM_{10}$  como  $PM_{2.5}$ . Las estaciones que no mostraron sus principales contribuciones del viento desde las direcciones en las que se encuentran ubicados los polígonos mineros de la zona de estudio (ZM5), reportaron diferencias significativas en los perfiles de los contaminantes con respecto a los puntos de monitoreo restantes, lo cual demuestra la influencia de la actividad minera en la ZCC. Lo anterior es consistente con las rosas de contaminación obtenidas, notando los niveles más altos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  desde los intervalos angulares donde se ubican los polígonos mineros más cercanos, con velocidades del viento superiores a 3 m/s.

Se resalta que la temperatura ambiente registra las relaciones más altas y consistentes en el período de estudio con respecto al material particulado, con una dirección directa en todos los casos. Se resalta que variables como altura de capa límite muestran tener una interdependencia alta de otras variables meteorológicas, interacciones que generan grandes desafíos para analizarla en conjunto con otras

variables. Sin embargo, se resalta la importancia y la alta relación de ella con las concentraciones de MP, ya que es la capa de la atmósfera más cercana a las fuentes de emisión, regula flujos de energía, cantidad de movimiento y por los fenómenos de transporte importantes que en ella ocurren, es un elemento clave para comprender los mecanismos que subyacen a la contaminación atmosférica.

Una menor correlación entre  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el período septiembre-noviembre son apreciadas, asociando dicha situación con la deposición húmeda, la cual se intensifica en esta época del año y afecta en diferente medida a cada tamaño de partícula, siendo más fácil en el caso del  $PM_{10}$  llegar a depositarse. Destacando de esta manera que al menos la precipitación afecta en diferente medida a los contaminantes atmosféricos analizados. El efecto de lavado atmosférico es seguramente el fenómeno más conocido en la interacción de esta variable con los contaminantes, es una correlación de naturaleza inversa y ocurre cuando la gota de agua interactúa con los contaminantes gaseosos del material particulado y por absorción y colisión la partícula cambia de matriz. Se recomienda que en futuras investigaciones se profundice la influencia diferenciada de este efecto dependiendo del horario (diurno o nocturno) de registro de los eventos de precipitación en la ZCC y la influencia de la estabilidad y la inversión térmica de la atmósfera en la dinámica de interacción.

Los trimestres DEF y MAM son períodos que a pesar de registrar condiciones meteorológicas que favorecen el desarrollo turbulento (altas temperaturas, radiación solar y alta altura de capa límite), se ven muy afectados por los incendios forestales locales y regionales. Este escenario y las relaciones directas y de magnitudes altas entre temperatura ambiente, altura de capa límite y material particulado, sugieren que a pesar de las condiciones termodinámicas favorables registradas, el MP tiende a aumentar sus niveles durante estos trimestres, catalogando a los meses dentro de ellos como los períodos de mayor concentración de contaminantes. Mientras que el año 2019 se posiciona como el período de concentraciones más altas, detonando la relación de este hallazgo con la influencia de la evolución del índice oceánico del niño (ONI).

En resumen, este tipo de investigaciones posibilita avanzar en el entendimiento de la influencia de las variables meteorológicas sobre el transporte y dispersión de contaminantes, y por tanto en los niveles de contaminación en la región. Este conocimiento posibilita la implementación de acciones de control efectivas que tiendan a disminuir las concentraciones de contaminantes y que propendan a reducir la ocurrencia de enfermedades respiratorias en la población. Reconociendo que esta investigación presenta limitaciones en el análisis de la estabilidad y turbulencia de la atmósfera, así como la influencia de eventos sinópticos en la zona, las cuales son variables claves para comprender la evolución de los contaminantes en la región.

## 5. Bibliografía

- Agencia Nacional de minería. (2019, May). *El Cesar produce el 64% del carbón del país*.  
<https://www.anm.gov.co/?q=el-cesar-produce-el-64-porciento-del-carbon-del-pais#:~:text=El Cesar produjo en este,64%25 de la producci3n nacional.>
- Araya, J. (2011). Resultados de un control de calidad de datos de temperatura superficial del aire y humedad relativa. *Tecnología En Marcha*, 24, 33–49. Recuperado a partir de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/77](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/77)
- Aristizábal, E., Carmona, M. I. A., & López, I. K. G. (2020). Definition and classification of torrential avenues and their impact in the Colombian Andes. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242–258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- Balogun, A. L., Tella, A., Baloo, L., & Adebisi, N. (2021). A review of the inter-correlation of climate change, air pollution and urban sustainability using novel machine learning algorithms and spatial information science. In *Urban Climate* (Vol. 40). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100989>
- Barreiro, M., Arizmendi, F., Diaz, N., & Trinchin, R. (2021). *Análisis de la variabilidad y tendencias observadas de los vientos en Uruguay*. Instituto Uruguayo de Meteorología. Recuperado a partir de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente>
- Barrera, H. A., Torres, R., Ruíz Suárez, L. G., García Yee, J. S., Torres Jaramillo, A., Martínez Bolívar, A. P., Gutiérrez López, W., García, L. M., de los Reyes, E., Robles, M., Retama Hernandez, A., & García Reynoso, J. A. (2019). Analysis of ozone transport in the atmospheric basin of puebla-tlaxcala in central Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 869–888.  
<https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.08>
- Bustamante, P., García, R., Maya, O., Rodriguez, J., & Aguilar, T. (2021). *MINERÍA DE CARBÓN EN COLOMBIA*. Recuperado a partir de <https://www.minenergia.gov.co/static/mineriaco/src>
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair - An r package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, 27–28, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- Cerón, W. L., Kayano, M. T., Andreoli, R. V., Canchala, T., Carvajal-Escobar, Y., & Alfonso-Morales, W. (2021). Rainfall Variability in Southwestern Colombia: Changes in ENSO-Related Features. *Pure and Applied Geophysics*, 178(3), 1087–1103. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02673-7>
- Chen, Z., Chen, D., Zhao, C., Kwan, M. po, Cai, J., Zhuang, Y., Zhao, B., Wang, X., Chen, B., Yang, J., Li, R., He, B., Gao, B., Wang, K., & Xu, B. (2020). Influence of meteorological conditions on PM2.5 concentrations across China: A review of methodology and mechanism. In *Environment International* (Vol. 139). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105558>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). *Balance Preliminar de las Economías de América Latina y el Caribe*. Recuperado a partir de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/bp>

- CORPOCESAR. (2021). *Informe anual del Sistema Especial de Vigilancia de Calidad del Aire de la zona carbonifera del Cesar*. Recuperado a partir de [https://www.corpocesar.gov.co/Transparencia\\_y\\_acceso\\_a\\_la\\_informacion\\_publica.html](https://www.corpocesar.gov.co/Transparencia_y_acceso_a_la_informacion_publica.html)
- DANE. (2021). *Proyecciones demográficas*. Recuperado a partir de <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/informes-estadisticas-sociodemograficas>
- DANE. (2023). *Cuentas departamentales: 2022 preeliminar*. Recuperado a partir de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- de Vasconcellos, L., Tavella, R. A., da Silva Bonifácio, A., Santos, J. E. K., & da Silva Júnior, F. M. R. (2022). Weekend effect on air pollutant levels in southernmost cities of Brazil with different economic activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10518-6>
- Dong, Z., Wang, S., Xing, J., Chang, X., Ding, D., & Zheng, H. (2020). Regional transport in Beijing-Tianjin-Hebei region and its changes during 2014–2017: The impacts of meteorology and emission reduction. *Science of the Total Environment*, 737. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139792>
- Duarte, A. L., Schneider, I. L., Artaxo, P., & Oliveira, M. L. S. (2022). Spatiotemporal assessment of particulate matter (PM10 and PM2.5) and ozone in a Caribbean urban coastal city. *Geoscience Frontiers*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101168>
- Feng, X., Wang, S., & Guo, J. (2022). Temperature inversions in the lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Seasonal feature and relation with regional atmospheric circulations. *Atmospheric Research*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106097>
- Galloza, D., & Ponce, L. (2022). *Contaminación por partículas pm10 y su relación con la temperatura y la humedad relativa en la ciudad de trujillo, la libertad 2021*. Universidad privada del Norte. Recuperado a partir de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30806>
- Gao, R., Wang, B., & Huang, S. (2021). Impacts of meteorological conditions on PM2.5 and PM10 pollution in Zhengzhou, China. *E3S Web of Conferences*, 257. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125703025>
- Guzmán, D., Ruiz, J., & Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual - Análisis de componentes principales*. Recuperado a partir de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119>
- Henao, J. J., Rendón, A. M., Hernández, K. S., Giraldo-Ramírez, P. A., Robledo, V., Posada-Marín, J. A., Bernal, N., Salazar, J. F., & Mejía, J. F. (2021). Differential effects of the covid-19 lockdown and regional fire on the air quality of medellín, colombia. *Atmosphere*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/atmos12091137>
- Hernández, M., Rodríguez, J., & González, D. (2020). Análisis de mixturas gaussianas de parámetros meteorológicos básicos: Temperatura y humedad relativa. *Tecnología En Marcha*, 6, 5–12. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i5.5068>

IDEAM. (2018). *Métodología de la operación estadística - Variables meteorológicas*. Recuperado a partir de <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/M-GDI-M-G002+GUIA+METODOL%C3%93GICA+DE+LA+OPERACI%C3%93N+ESTADISTICA+VARIABLES+METEOROL%C3%93GICAS.pdf/16ed20ac-dd40-4e37-a296-632e6e6d83fe>

International Energy Agency. (2021). *Electricity Market Report*. Recuperado a partir de <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-july-2021>

Jin, C., Wang, Y., Li, T., & Yuan, Q. (2022). Global validation and hybrid calibration of CAMS and MERRA-2 PM 2.5 reanalysis products based on OpenAQ platform. *Atmospheric Environment*, 274(118972). <https://doi.org/10.5281/zenodo.5168102>

Kayes, I., Shahriar, S. A., Hasan, K., Akhter, M., Kabir, M. M., & Salam, M. A. (2019). The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(3), 265–278. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2019.03.01>

Liu, T., & Liu, S. (2020). The impacts of coal dust on miners' health: A review. *Environmental Research*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109849>

Lozano, J. (2020). *Enseñanza de la inversión térmica y su relación con la acumulación de contaminantes en la tropósfera*. [Trabajo de grado para optar al título de Licenciada en Física]. Univeridad pedagógica Nacional. Recuperado a partir de <https://repositorio.pedagogica.edu.co/>

Lu, X., Zhang, S., Xing, J., Wang, Y., Chen, W., Ding, D., Wu, Y., Wang, S., Duan, L., & Hao, J. (2020). Progress of Air Pollution Control in China and Its Challenges and Opportunities in the Ecological Civilization Era. In *Engineering* (Vol. 6, Issue 12, pp. 1423–1431). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.03.014>

Masood, A., & Ahmad, K. (2021). A review on emerging artificial intelligence (AI) techniques for air pollution forecasting: Fundamentals, application and performance. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 322). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129072>

Méndez, J. F., Pinto Herrera, L. C., & Belalcázar Cerón, L. C. (2018). Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 17–34. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a1>

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Recuperado a partir de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

Ministerio de salud y protección social. (2021, August). *Minsalud comprometido con la calidad del aire*. Boletín de Prensa No 872 de 2021. Recuperado a partir de <https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx#:~:text=Bogot%C3%A1%2C%2023%20de%20agosto%20de%202021.&text=As%C3%AD%20mi smo%2C%20El%20Departamento%20Nacional,1%2C5%20%25%20del%20PIB.>

- Mohammadrezaei, M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Effect of Enso indices on meteorological drought in the midwest of Iran. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(2), 13–27. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.9632.1053>
- Montoya, F. A., & Mesa, Ó. J. (2015). CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD ESPACIO – TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA. *Revista EIA*, 12(24), 131–150. <https://doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>
- Morales, L. (2012). *Variabilidad espacial y temporal de material particulado en la zona carbonífera del Cesar*. Universidad Industrial de Santander. Recuperado a partir de <https://tangara.uis.edu.co/>
- Morales, M. (2018). *Contribución de fuentes particulares a Material Particulado en el corregimiento la Loma, Zona Minera del Cesar* [Trabajo Final de Maestría para optar el título de: Magister en Ingeniería Ambiental]. Semillero de investigación salud ambiental grupo INAM, Universidad Santo Tomás. <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2020.02553>
- Navarro, H. (2019). *Simulación del transporte y dispersión de partículas PM10 producidas por quema de biomasa sobre los Andes Centrales de Perú con ayuda del modelo químico – meteorológico WRF-Chem* [Para optar el Grado Académico de Magister en Física con mención en Geofísica]. Universidad del Perú.
- Nidzgorska-Lencewicz, J., & Czarnecka, M. (2020). Thermal inversion and particulate matter concentration in Wrocław in winter season. *Atmosphere*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/atmos11121351>
- Nogarotto, D. C., & Pozza, S. A. (2020). A review of multivariate analysis: is there a relationship between airborne particulate matter and meteorological variables? In *Environmental Monitoring and Assessment* (Vol. 192, Issue 9). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08538-1>
- Orozco, J., Vargas, H., & Chamorro, J. (2020). Neumoconiosis asociada a la exposición de polvo de carbón y de sílice en sitios de minería en el departamento del Cauca. *Revista Colombiana de Neumonología* (Vol. 32, 2). <https://doi.org/10.30789/rcneumologia.v32.n2.2020.538>
- Pacheco, P. R., Parodi, M. C., Mera, E. M., & Salini, G. A. (2020). Meteorological variables and concentration levels of particulate matter of 10 µm in Andacollo, Chile: A dispersion and entropy study. *Informacion Tecnologica*, 31(6), 171–182. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600171>
- Pearce, J. L., Beringer, J., Nicholls, N., Hyndman, R. J., & Tapper, N. J. (2011). Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models. *Atmospheric Environment*, 45(6), 1328–1336. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.051>
- Quiroz, E., & Hidalgo, H. (2016). *TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS* (Vol. 15).
- Ramírez, R. (2022). *Contaminación atmosférica por material particulado en un territorio urbano y de montaña. Caso de estudio Valle de Aburrá, Colombia*. [Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos]. Universidad nacional de Colombia.

- Represa, N. S., Fernández-Sarría, A., Porta, A., & Palomar-Vázquez, J. (2019). Data Mining Paradigm in the Study of Air Quality. In *Environmental Processes* (Vol. 7, Issue 1). Springer.  
<https://doi.org/10.1007/s40710-019-00407-5>
- Rojano, R., Arregoces, H., Angulo, L., & Restrepo, G. (2018). Analysis and Origin of TSP and PM10 Concentrations in Open-pit Coal Mining using Polar Plots. *Informacion Tecnologica*, 29(6), 131–142.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000600131>
- Rojano, R., Arregocés, H., & Gámez Frías, E. (2021). Changes in ambient particulate matter during the COVID-19 and associations with biomass burning and Sahara dust in northern Colombia. *Heliyon*, 7(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08595>
- Rojano, R., Manzano, C., Toro, R. A., Morales, R. G. E. S., Restrepo, G., & Leiva, M. A. G. (2018). Potential local and regional impacts of particulate matter emitted from one of the world's largest open-pit coal mines. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 11(5), 601–610. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0542-4>
- Roldán-Henao, N., Hoyos, C. D., Herrera-Mejía, L., & Isaza, A. (2020). An investigation of the precipitation net effect on the particulate matter concentration in a narrow valley: Role of lower-troposphere stability. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(3), 401–426.  
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0313.1>
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling and Software*, 95, 210–228.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Sridharan, S., Kumar, M., Singh, L., Bolan, N. S., & Saha, M. (2021). Microplastics as an emerging source of particulate air pollution: A critical review. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 418). Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126245>
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). Noaa's hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 96, Issue 12, pp. 2059–2077). American Meteorological Society.  
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Ulloa, J., Álvarez, D., Peña, A., & Suárez, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas PM 2.5 de una ciudad altoandina. *High Andean Research*, 24, 199–207.  
<https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>
- Varona, M., Pinilla, M., Briceño, L., Groot, H., Narváez, D., Palma, R., Herrera, D., & Torres, C. (2018). Evaluación de la exposición al polvo de carbón y sílice en sitios de minería subterránea en tres departamentos de Colombia. *Biomédica*;38, 467-478.  
<https://doi.org/10.7705/biomedica.v38i4.4183>
- Wang, Y., & He, L. (2020). Effect of rainfall intensity on PM10 and PM2.5 scavenging in Guangzhou at night. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 450(1).  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/450/1/012075>

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Recuperado a partir de <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Wu, Z., & Zhang, S. (2018). Study on the spatial–temporal change characteristics and influence factors of fog and haze pollution based on GAM. *Neural Computing and Applications*, 31(5), 1619–1631. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3532-z>

Yan, Y., Cai, X., Miao, Y., & Yu, M. (2022). Synoptic condition and boundary layer structure regulate PM2.5 pollution in the Huaihe River Basin, China. *Atmospheric Research*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106041>