



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

MODELACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO IDENTIFICANDO LA CONTRIBUCIÓN DE LAS FUENTES - VIGENCIA 2022

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 036 DE 2021 CVC-UNAL

**INFORME ACTIVIDAD 017 “MODELACIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO IDENTIFICANDO LA CONTRIBUCIÓN DE LAS
FUENTES (METEOROLÓGICO)”**

**RESULTADO 1 “RESIDUOS Y EMISIONES CARACTERIZADOS
Y EVALUADOS”**

**PROYECTO 4001 “CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL
AIRE Y RESIDUOS, Y FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE
PROMOCIÓN PARA SU GESTIÓN AMBIENTAL”**

**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 036 DE 2021
CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA
REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA -CVC- Y LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DICIEMBRE 2022**

EQUIPO DE TRABAJO UNAL

Germán Rueda Saa
Director del Proyecto

Rodrigo Jiménez Pizarro
Director Científico

Liseth González Delgado
Coordinadora General

Carlos Mario González Duque
Coordinador Modelación y Simulación

Felipe Cifuentes Castaño
Profesional Modelación y Simulación

Andrés Ardila Ardila
Profesional Modelación y Simulación

EQUIPO DE TRABAJO CVC

COMITÉ TÉCNICO:

Nubia Madeleine Bastidas Bonilla
Supervisora

Marleni Marín Ocampo
DAR Suroccidente

Alexander Barona Serrano
Profesional DGA

Sigifredo Salgado Echeverri
Ingeniero Agrónomo
Profesional especializado, DGA

PROFESIONALES DE APOYO:

Carlos Fernando De Jesús Murillo
Profesional Contratista, DTA

Ever Alonso Ríos Sosa
Ingeniero Sanitario
Profesional Contratista, DAR Suroccidente

CONTENIDO

1. CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO METEOROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AIRE A PARTIR DE ESTACIONES EN SUPERFICIE	17
INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. MARCO REFERENCIAL RELACIONADO CON EL COMPORTAMIENTO DE LOS VIENTOS EN EL VRC	17
1.2. DEPURACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	18
1.2.1. Estaciones con información meteorológica	18
1.2.2. Procedimientos de depuración	20
1.2.3. Análisis de patrones de circulación atmosféricos sobre el VRC.....	24
1.3. DEPURACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE	27
1.3.1. Procedimiento de depuración de datos de calidad del aire obtenidos en estaciones de monitoreo del VRC.....	29
1.3.2. Análisis de información de calidad del aire.....	34
1.3.3. Comportamiento del material particulado en el municipio de Yumbo.....	35
1.3.4. Comportamiento del material particulado en el municipio de Palmira	39
1.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
INTRODUCCIÓN.....	46
2.1. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA CON PROPÓSITOS DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE	48
2.1.1. Simulación con emisión de trazadores continuos para establecer el área de influencia con propósitos de simulación.....	48
2.1.1.1. Puntos de inyección de trazadores y valores asignados.....	49
2.1.1.2. Configuración del modelo de calidad del aire para la simulación de trazadores 50	
2.1.1.3. Post-procesamiento de resultados	50
2.1.1.4. Resultados obtenidos en la definición del área de influencia con propósitos de simulación.....	51
2.1.2. Simulación con trazadores por pulsos para el estudio de la circulación atmosférica en el área de influencia	56
2.2. INVENTARIOS DE EMISIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA.....	59

2.3. DESAGREGACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LOS INVENTARIOS DE EMISIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA CON PROPÓSITOS DE SIMULACIÓN	64
2.3.1. Distribución de emisiones por fuentes móviles en Yumbo y Palmira	69
2.3.2. Distribución de emisiones por fuentes móviles en Cali y demás municipios del área de influencia	72
2.3.3. Distribución de emisiones para fuentes estacionarias puntuales	74
2.3.4. Distribución de emisiones por quemas abiertas en precosecha e incendios ...	77
2.3.5. Distribución de emisiones para fuentes difusas	78
2.3.6. Generación de archivo unificado de emisiones	82
2.3.7. Especiación del material particulado y los compuestos orgánicos volátiles	86
2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
INTRODUCCIÓN.....	90
3.1. CONFIGURACIÓN BASE DEL MODELO DE SIMULACIÓN WRF-Chem	92
3.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA SELECCIÓN DEL MECANISMO QUÍMICO Y ESQUEMA DE AEROSOLES.....	93
3.2.1. Mecanismos químicos evaluados.....	94
3.2.2. Emisiones incluidas en los análisis de sensibilidad	95
3.2.3. Datos observados y evaluación de resultados del modelo.....	95
3.2.4. Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad para selección del mecanismo químico y esquema de aerosoles	98
3.2.4.1. Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de material particulado, PM ₁₀	98
3.2.4.2. Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de material particulado, PM _{2.5}	101
3.2.4.3. Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de ozono troposférico O ₃	102
3.2.5. Selección final del mecanismo óptimo para las simulaciones de calidad del aire	104
3.3. SIMULACIONES BASE CON LA TOTALIDAD DE EMISIONES PARA LOS PERIODOS DE INTERÉS	104
3.3.1.1. Evaluación del modelo y análisis de resultados	105
3.3.2. Resultados obtenidos en las simulaciones base para concentraciones de material particulado.....	106
3.3.2.1. Análisis de perfiles horarios simulados de PM ₁₀	106
3.3.2.2. Análisis de perfiles horarios simulados de PM _{2.5}	109

3.3.2.3. Mapas de concentración con promedios horarios de material particulado obtenidos en el VRC. Análisis del transporte de contaminantes asociado con el comportamiento de los vientos.....	112
3.3.2.4. Mapas de concentración promedio de material particulado y comparación preliminar con normativa colombiana.....	118
3.4. EJERCICIO DE ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN DE FUENTES AL MATERIAL PARTICULADO	121
3.4.1. Periodos de simulación y configuración del modelo en los ejercicios de contribución de fuentes	122
3.4.1.1. Procedimiento para determinación de diferencias absolutas y porcentuales en los ejercicios de contribución de fuentes.....	123
3.4.2. Resultados obtenidos en términos de contribución porcentual para cada ejercicio propuesto.....	124
3.4.3. Resultados obtenidos en términos de contribución absoluta	127
3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	131

Contenido de Figuras

Figura 1. Ubicación de estaciones meteorológicas con información horaria, obtenida para análisis en el VRC	20
Figura 2. Perfil promedio horario de Radiación Solar en las estaciones AER y ERA durante 2018.....	21
Figura 3. Esquematización del proceso de depuración de datos meteorológicos. a) Aplicación de filtros de mediana con un rango de 4 desviaciones estándar alrededor de la mediana horaria para temperatura. b) Correlación lineal entre la temperatura y la humedad relativa. c) Histogramas aplicados para la velocidad del viento	22
Figura 4. Velocidad y dirección promedio horario del viento en cada estación sobre el VRC durante septiembre de 2018.....	25
Figura 5. Perfil vertical de la dirección del viento para el 2018 sobre el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón.	26
Figura 6. Modelo conceptual de patrones de circulación atmosféricos en el VRC. a) Periodo bajo la influencia de la marea del Pacífico. b) Periodo sin la influencia de la marea del Pacífico.	27
Figura 7. Localización estaciones de calidad del aire analizadas sobre el Valle del Cauca	30
Figura 8. Identificación (puntos rojos) del fenómeno de deriva y corrección (puntos azules) para concentraciones de monóxido de nitrógeno (NO) en la estación TUL	31
Figura 9. Identificación de datos inusualmente repetidos (franja rosa) para dióxido de azufre (SO ₂) en la estación PAL.....	31
Figura 10. Identificación de periodos sin captura de datos para el ozono troposférico (O ₃) en la estación MPAL.....	32
Figura 11. Proceso de identificación de datos considerados como atípicos para el PM ₁₀ en la estación ACO.....	33
Figura 12. Ubicación de las estaciones del SVCA de la CVC en a) Municipio de Yumbo. b) Municipio de Palmira	35
Figura 13. Comportamiento del PM ₁₀ en las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario	37
Figura 14. Comportamiento del PM _{2,5} en las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario	39
Figura 15. Comportamiento del PM ₁₀ en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario	41
Figura 16. Comportamiento del PM _{2,5} en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal	

con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario	43
Figura 17. Ubicación de los puntos de inyección de trazadores con emisión continua.....	49
Figura 18. Mapas de concentración máxima de trazadores para las inyecciones de emisión continua realizadas en Buenaventura, Cartago, Santander de Quilichao y Tuluá	52
Figura 19. Serie temporal de concentraciones del trazador detectado sobre Palmira y Yumbo	53
Figura 20. Mapas de concentración máxima de trazadores para las inyecciones de emisión continua realizadas en el norte y sur de Cali.....	54
Figura 21. Serie temporal de concentraciones de trazador detectado sobre Palmira y Yumbo, producto de las inyecciones sobre el norte y sur de Cali	55
Figura 22. Municipios que componen el área de influencia con propósitos de simulación de calidad del aire sobre Yumbo y Palmira	56
Figura 23. Ubicación de los puntos de inyección de trazadores por pulsos.....	57
Figura 24. Resultados de simulación con trazadores por pulsos. a) 1 hora posterior a la emisión. b) 8 horas después de la emisión	59
Figura 25. Contribución porcentual a la emisión por tipo de contaminante de las distintas fuentes de emisión consideradas en el área de influencia para la simulación	62
Figura 26. Cuadrícula para desagregación espacial de emisiones	66
Figura 27. Emisiones de CO a nivel de arco de vía por fuentes móviles en Yumbo y Palmira a las 7 hora local.....	70
Figura 28. Emisiones de CO por fuentes móviles en Yumbo y Palmira a las 7 hora local, agregadas en celdas de 1 km x 1 km	70
Figura 29. Distribución temporal de emisiones horarias de PM _{2.5} para el inventario de fuentes móviles de los municipios de Palmira y Yumbo (en conjunto) para un día típico de semana (línea roja) y domingo (línea azul)	71
Figura 30. Emisiones de CO por fuentes móviles en Yumbo y Palmira para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio en celdas de 1km x 1km.	72
Figura 31. Emisiones de CO por fuentes móviles en Cali para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio.....	73
Figura 32. Emisiones de CO por fuentes móviles en otros municipios del área de influencia para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio	74
Figura 33. Distribución de emisiones para el PM _{2.5} del sector industrial para los municipios de Palmira y Yumbo.	75
Figura 34. Emisiones de PM _{2.5} para los sectores industriales de Yumbo (panel superior) y Palmira (panel inferior) a las 12 hora local (-5 UTC).	76
Figura 35. Histograma de hora de inicio y duración de los episodios de quema precosecha e incendios.....	77
Figura 36. Emisiones de PM _{2.5} por quemas abiertas en precosecha e incendios durante agosto de 2018.	78
Figura 37. Área sembrada de los cultivos más representativos para los municipios de interés	80
Figura 38. Distribución de emisiones de PM ₁₀ por resuspensión en actividades agrícolas sobre los municipios del área de influencia a las 12:00 hora local (-5 UTC).....	81

Figura 39. Distribución temporal de emisiones por fuentes estacionarias difusas de $PM_{2.5}$ en los inventarios de resuspensión por actividades agrícolas y el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	81
Figura 40. Emisión total diaria de $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, VOC, NO_x y SO_2 en el área de influencia para la simulación en un día laboral típico	84
Figura 41. Representación de la distribución espacial y temporal de emisiones horarias de $PM_{2.5}$ en el área de influencia para la simulación en un día laboral típico.	85
Figura 42. Comparación de inventarios de emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$. Panel izquierdo inventario de emisiones estimado en el área de influencia. Panel derecho inventario de emisiones global EDGAR-HTAP	86
Figura 43. Esquema general del componente de simulación de calidad del aire y análisis de contribución de fuentes.....	91
Figura 44. Configuración de dominios de simulación (derecha) y acercamiento sobre el dominio objetivo (izquierda) para la simulación de calidad del aire.....	92
Figura 45. Ubicación de estaciones de calidad del aire utilizadas como puntos de análisis para evaluar los resultados de la simulación de calidad del aire.....	97
Figura 46. Perfiles horarios de PM_{10} observados y simulados con diferentes mecanismos químicos	99
Figura 47. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados con diferentes mecanismos químicos	102
Figura 48. Perfiles horarios de O_3 observados y simulados con diferentes mecanismos químicos	103
Figura 49. Perfiles horarios de PM_{10} observados y simulados en relación con puntos de monitoreo de los municipios de Palmira y Yumbo.....	108
Figura 50. Perfiles horarios de PM_{10} observados y simulados en relación con puntos de monitoreo ubicados en otras regiones del área de influencia para la simulación	108
Figura 51. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados en relación con puntos de monitoreo de los municipios de Palmira y Yumbo.....	111
Figura 52. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados en relación con puntos de monitoreo ubicados en otras regiones del área de influencia para la simulación	111
Figura 53. Mapas de concentración promedio horaria de $PM_{2.5}$ y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución.....	114
Figura 54. Mapas de concentración promedio horaria de $PM_{2.5}$ y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución. Acercamiento sobre Yumbo y Palmira	115
Figura 55. Mapas de concentración promedio horaria de PM_{10} y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución Acercamiento sobre Yumbo y Palmira	116
Figura 56. Mapa de altura promedio de la capa de mezcla simulada para distintas horas del día. Acercamiento sobre los municipios de Yumbo y Palmira.....	117
Figura 57. Comparación del perfil promedio diario de altura de capa de mezcla simulada para el periodo 1 frente a estimaciones de capa límite atmosférica obtenidos mediante mediciones LiDAR (Céspedes, 2019) en la estación UVA durante el mes de agosto de 2018	118

Figura 58. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre los municipios de Yumbo y Palmira. .	119
Figura 59. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre la zona urbana del municipio de Yumbo.	120
Figura 60. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre la zona urbana del municipio de Palmira.	121
Figura 61. Polígonos definidos para el análisis de contribución de fuentes	124
Figura 62. Concentración promedio de $PM_{2.5}$ obtenida por regiones de interés para el ejercicio base ID0 y el ejercicio de contribución de fuentes ID2.....	125
Figura 63. Mapas de concentración promedio y contribución absoluta de $PM_{2.5}$ para los ejercicios ID1, ID2 e ID3.	129
Figura 64. Mapas de concentración promedio y contribución absoluta de $PM_{2.5}$ para los ejercicios ID4, ID5 e ID6	130

Contenido de Tablas

Tabla 1. Porcentaje de avance de subactividades para el presente informe relacionadas con la actividad 017 – Vigencia 2021.....	15
Tabla 2. Resumen de estaciones meteorológicas que fueron objeto de depuración y análisis en el VRC	18
Tabla 3. Rangos de depuración inicial para las variables meteorológicas	20
Tabla 4. Resultados del proceso de depuración de datos meteorológicos para el periodo 2010-2020 en las estaciones de análisis.....	23
Tabla 5. Estaciones de Calidad del Aire y contaminantes monitoreados sobre el Valle del Cauca	29
Tabla 6. Número de datos capturados, datos válidos y representatividad para los diferentes contaminantes atmosféricos monitoreados por la CVC entre el 2016 y 2020.....	34
Tabla 7. Estaciones del SVCA de la CVC ubicados sobre los municipios de Palmira y Yumbo.....	34
Tabla 8. Resumen de fuentes tenidas en cuenta en la estimación de los Inventarios de emisiones atmosféricas desarrollados para los municipios del área de influencia para la simulación de calidad del aire.....	47
Tabla 9. Inventarios de emisión desarrollados y contaminantes atmosféricos estimados en el inventario del área de influencia con fines de simulación.....	60
Tabla 10. Listado de documentos anexos con descripción detallada de los inventarios de emisión desarrollados en el área de influencia.....	61
Tabla 11. Consolidado de los flujos totales anuales de emisión obtenidos en el área de influencia con propósitos de simulación	63
Tabla 12. Metodología usada en la desagregación/agregación espaciotemporal de emisiones en el dominio de simulación asociada con cada inventario de emisiones desarrollado.....	66
Tabla 13. Resumen de archivos de emisiones para diferentes fuentes desagregadas espaciotemporalmente y con especiación química para el mecanismo RACM-MADE/VBS.....	82
Tabla 14. Composición del material particulado usado como información de entrada en el modelo de simulación de calidad del aire.....	87
Tabla 15. Configuración del modelo WRF-Chem, para la simulación de calidad del aire con el componente químico activado	93
Tabla 16. Características principales de los mecanismos químicos a evaluar en el análisis de sensibilidad	94
Tabla 17. Características principales de los mecanismos químicos a evaluar en el análisis de sensibilidad	95
Tabla 18. Estaciones de calidad del aire en el área de influencia que fueron empleadas para el análisis y evaluación de las simulaciones realizadas	96
Tabla 19. Estadísticos de desempeño para la predicción de PM ₁₀ durante los análisis de sensibilidad.....	100

Tabla 20. Estadísticos de desempeño para la predicción de $PM_{2.5}$ durante los análisis de sensibilidad.....	101
Tabla 21. Estadísticos de desempeño para la predicción de O_3 durante los análisis de sensibilidad.....	103
Tabla 22. Estadísticos de desempeño para la predicción de PM_{10} durante los periodos base de análisis.....	107
Tabla 23. Estadísticos de desempeño para la predicción de $PM_{2.5}$ durante los periodos base de análisis.....	110
Tabla 24. Ejercicios de contribución de fuentes propuestos	122
Tabla 25. Concentración promedio por áreas de análisis	126
Tabla 26. Contribución porcentual promedio por área de análisis	127
Tabla 27. Contribución absoluta promedio por áreas de análisis.....	128

RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe contiene la descripción metodológica y análisis de resultados obtenidos en relación con la Actividad 017 “Modelación de material particulado, identificando la contribución de las fuentes”, para la vigencia 2022 asociada al Proyecto 4001 “Caracterización de la calidad del aire y residuos, y formulación de alternativas de promoción para su gestión ambiental”, Resultado 1 “Residuos y emisiones caracterizados y evaluados” el marco del Convenio Interadministrativo 036 de 2021 CVC-UNAL.

Esta etapa del proyecto se centró en tres componentes que son descritos cada uno en capítulos del presente informe. El capítulo 1 describe los procedimientos de depuración y resultados obtenidos en el análisis de información meteorológica y de calidad del aire en superficie obtenida de distintas estaciones de monitoreo ubicadas sobre el valle geográfico del Rio Cauca, actividad que permitió, por ejemplo, proponer un modelo conceptual asociado con los patrones de circulación atmosférica en el valle geográfico del Rio Cauca.

En el capítulo 2, se describen los resultados asociados con la definición del área de influencia con propósitos de simulación de calidad del aire con cubrimiento de los municipios de Yumbo y Palmira y zonas circundantes que pueden tener un efecto en el transporte regional de contaminantes atmosféricos. Sobre el área de influencia, se realizó la compilación de los inventarios de emisión con propósitos de simulación de calidad del aire y la desagregación espaciotemporal de estos inventarios.

Finalmente, el capítulo 3 describe el ejercicio de simulación de calidad del aire regional llevado a cabo con el modelo euleriano WRF-Chem a partir de la información de los inventarios de emisión obtenidos en el área de influencia, ejercicio que estuvo enfocado en el análisis del comportamiento del contaminante material particulado. Adicionalmente, la simulación de calidad del aire permitió llevar a cabo un análisis de contribución de fuentes emisión enfocado principalmente en analizar el efecto de fuentes de emisión principales sobre las concentraciones de material particulado en municipios de interés como lo son Yumbo y Palmira.

AVANCE PORCENTUAL DE ACTIVIDADES

Como parte de los compromisos adquiridos en marco del Convenio, se planteó el desarrollo de subactividades específicas las cuales se resumen en la Tabla 1, especificando los porcentajes de avance obtenidos. Estas actividades están asociadas principalmente con la Actividad 017 “Modelación de material particulado, identificando la contribución de las fuentes” y referidas a la vigencia 2022. Se presenta además el porcentaje global de avance obtenido a la fecha donde se destaca el cumplimiento de los productos pactados.

Tabla 1. Porcentaje de avance de subactividades para el presente informe relacionadas con la actividad 017 – Vigencia 2021.

Actividad general	Subactividad	Avance presente informe	Avance actividad general
a. Validación de información priorizada de los municipios asignados; Palmira y Yumbo.	Análisis y transcripción de información recopilada de estaciones de calidad del aire	100%	100%
	Acompañamiento a equipo de inventarios de emisión en la revisión de estructura y contenido de bases de datos finales de inventario de emisión en Yumbo y Palmira para su posterior uso en simulaciones de calidad del aire	100%	
	Diseño de metodología y algoritmos computacionales para generar los archivos compatibles con modelo de calidad del aire a partir de resultados de inventarios de emisión en Yumbo y Palmira	100%	
b. Proceso de desagregación espaciotemporal para el inventario regional en zonas diferentes a Palmira y Yumbo.	Definición de cobertura de inventario regional	100%	100%
	Apoyo en el levantamiento y revisión de información secundaria con inventarios de emisión existentes y/o registros de actividad para la estimación de emisiones en municipios diferentes a Yumbo y Palmira que hacen parte de la región de análisis	100%	
	Ejercicios de estructuración de bases de datos y <i>regridding</i> de emisiones por fuentes móviles en municipios diferentes a Yumbo y Palmira	100%	
	Ejercicios de estructuración de bases de datos y desagregación espaciotemporal de emisiones por fuentes estacionarias en municipios diferentes a Yumbo y Palmira para incorporar emisiones en modelo de calidad del aire	100%	
c. Obtención, síntesis y selección de información meteorológica en municipios	Solicitud y descarga de información meteorológica y de calidad del aire a las entidades correspondientes para el 2018 (CVC, Cenicaña, DAGMA, universidades, IDEAM, otras entidades)	100%	100%
	Consolidación final de bases de datos y depuración de la información meteorológica suministrada.	100%	

Actividad general	Subactividad	Avance presente informe	Avance actividad general
diferentes a Palmira y Yumbo.	Selección de estaciones a usar para estudio sinóptico y meso escala de parámetros de circulación y validación de simulaciones	100%	
d. Proceso de avance en la estimación del inventario regional en zonas diferentes a Palmira y Yumbo, con su respectiva síntesis y revisión.	Análisis comparativo de inventarios de emisiones de municipios de Yumbo y Palmira e inventario regional. Priorización de fuentes	100%	100%
	Generación de archivos que permitan estudio independiente de contribución de fuentes asociadas a emisiones en Yumbo y Palmira, archivos compatibles con modelo de calidad del aire a partir de resultados de los inventarios locales	100%	
	Generación de archivos que permitan estudio independiente de contribución de fuentes asociadas a emisiones regionales, archivos compatibles con modelo de calidad del aire a partir de resultados del inventario regional	100%	
e. Parametrización, optimización, corridas y validación de la simulación de calidad del aire con énfasis en material particulado.	Selección de configuración de parametrizaciones y mecanismos químicos que serán objeto de análisis de sensibilidad, asimismo estructuración de protocolo de corridas y validación de simulaciones. Definición de cobertura de periodo de simulación según análisis de sensibilidad	100%	100%
	Simulación de calidad del aire con inventarios locales y regionales (análisis de sensibilidad con base en primer periodo de simulación)	100%	
	Validación y análisis de resultados de primer periodo de interés	100%	
	Validación y análisis de resultados de segundo periodo de interés	100%	
	Simulaciones de calidad del aire enfocadas en análisis y contribución de fuentes de emisión	100%	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO METEOROLÓGICO Y DE CALIDAD DEL AIRE A PARTIR DE ESTACIONES EN SUPERFICIE

INTRODUCCIÓN

En marco de la Actividad 017 “Modelación de material particulado, identificando la contribución de las fuentes” del Convenio interadministrativo 036 de 2021 CVC-UNAL, se estableció como etapa inicial la caracterización meteorológica y de calidad del aire en el Valle de Cauca, a partir del análisis de información de las estaciones en superficie sobre la región de estudio. Este ejercicio brinda herramientas sólidas con el objetivo de comprender el papel de la meteorología en la dinámica de los contaminantes del aire, así como el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos, con enfoque principal sobre el material particulado en sus fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$.

En este primer capítulo se describen los procesos llevados a cabo para la depuración y el posterior análisis espaciotemporal de las diferentes variables meteorológicas y contaminantes atmosféricos monitoreados sobre el Valle del Cauca. En este sentido, el presente informe se enfoca en describir procedimientos de depuración adicionales llevados a cabo en la vigencia 2022 y discute principalmente los resultados en función del modelo conceptual propuesto sobre el comportamiento de los vientos en el Valle geográfico del Rio Cauca (VRC). Se presenta inicialmente una descripción general del proceso de depuración de información meteorológica y de calidad del aire, posteriormente los resultados del análisis de datos basado en los patrones de circulación y análisis temporal de contaminantes atmosféricos como el material particulado sobre el VRC, con énfasis en los municipios de Yumbo y Palmira. Es importante destacar que esta actividad también fue llevada a cabo durante la vigencia 2021, por lo tanto, otros resultados que hacen parte del análisis específico para cada una de las variables de análisis (principalmente de variables meteorológicas) se describen en el informe asociado de dicha vigencia.

1.1. MARCO REFERENCIAL RELACIONADO CON EL COMPORTAMIENTO DE LOS VIENTOS EN EL VRC

El Valle geográfico del Rio Cauca (VRC) se ubica entre los ramales central y occidental de la cordillera de los Andes, a una altitud media de 1000 m.s.n.m. La cordillera Central presenta una elevación media de 3500 m y picos que superan los 5000 m, de otra parte, la cordillera Occidental presenta una elevación promedio más baja de unos 2300 m con picos de hasta 4000 m (López & Howell, 1967). El VRC cuenta con un área de 5287 km², extendiéndose desde el norte del departamento de Cauca, pasando por el departamento del Valle del Cauca y llegando hasta el sur de los departamentos de Risaralda y Caldas.

Sobre la región convergen vientos provenientes del oriente y occidente, sin embargo, la cordillera Central proporciona una barrera topográfica frente a la entrada de las corrientes del oriente, dando como resultado un dominio de las corrientes de bajo nivel provenientes del occidente. Uno de los ejemplos es el chorro de bajo nivel del Chocó (ChocoJet), el cual llega con un alto contenido de humedad después de su larga trayectoria sobre el océano Pacífico (López & Howell, 1967), este puede ser más o menos intenso según la época del año y según la presencia de fenómenos sinópticos como el ENSO (Yepes et al., 2019). El aire ya frío, se enfría aún más a medida que avanza tierra adentro debido a la evaporación de la abundante precipitación inducida por la topografía (López & Howell, 1967).

El aire fluye tierra adentro, conteniéndose en la cordillera Occidental hasta desbordarse en las crestas más bajas y descendiendo por la vertiente oriental de la cordillera Occidental, donde interactúa con el viento ascendente del valle en horas tarde. Dado que la intensificación de la convección a menudo tiene lugar cerca al atardecer, los vientos fríos, intensos e intermitentes también soplan con frecuencia cuesta abajo a las últimas horas de la tarde desde la cordillera Occidental (López & Howell, 1967).

1.2. DEPURACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

1.2.1. Estaciones con información meteorológica

Como se describe en detalle en el informe “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021”, el proceso de adquisición y fuentes de información meteorológica se realizó a través de diferentes entidades con estaciones de monitoreo en el VRC, a partir de las cuales se obtuvo información entre 2010 y 2020 para las variables de temperatura ambiente (T), humedad relativa (HR), presión barométrica (PB), radiación global (RG), precipitación (PP), velocidad (WS) y dirección del viento (WD). Asimismo, se obtuvo información del comportamiento de variables meteorológicas en la vertical para el 2018 a partir de registros de radiosondeos en el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (ABA), esta información incluye datos en altitud para variables como presión barométrica, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, entre otras. La Figura 1 y la Tabla 2 resume la ubicación, entidad responsable, abreviaturas usadas y variables meteorológicas monitoreadas por cada una de las estaciones sobre el VRC que fueron objeto de análisis.

Tabla 2. Resumen de estaciones meteorológicas que fueron objeto de depuración y análisis en el VRC

Estación	Abreviación	Entidad	Información Disponible	Unidades
Acopi	ACO	CVC	PB, WS, WD, T, HR	hPa, m/s, °, °C, %
Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	AER	AEROPUERTO - IDEAM	IDEAM= RG- AEROPUERTO=PB, WS, WD, T, HR, Radiosondeos	W/m ² - hPa, m/s, °, °C, %
Atuncela	ATU	CVC	WS, WD	m/s, °

Estación	Abreviación	Entidad	Información Disponible	Unidades
Base Aérea Marco Fidel Suarez	BAS	IDEAM-DAGMA	RG, HR - T	W/m ² , % - °C
Cañaveralejo	CAN	DAGMA	WS, WD, T, HR	m/s, °, °C, %
Compartir	COM	DAGMA	PP, RG, PB, WS, WD, T, HR	mm, W/m ² , hPa, m/s, °, °C, %
Duende	DUE	CVC	WS, WD	m/s, °
Edificio CVC	EDI	CVC	WS, WD	m/s, °
El Placer	PLA	IDEAM	PP, WS, WD, T, HR	mm, m/s, °, °C, %
El Vinculo	VIN	IDEAM	PP, PB, WS, WD, T, HR	mm, hPa, m/s, °, °C, %
Ermita	ERM	DAGMA	T, HR	°C, %
Farallones	FAR	IDEAM	PP, PB, WS, WD, T, HR	mm, hPa, m/s, °, °C, %
Juanchaco	JUA	IDEAM	PB, WS, WD, T, HR	hPa, m/s, °, °C, %
La Cumbre	CUM	IDEAM	PP, PB, WS, WD, T, HR	mm, hPa, m/s, °, °C, %
La Diana	DIA	IDEAM	PP, PB, WS, WD, T, HR	mm, hPa, m/s, °, °C, %
La Independencia	IND	IDEAM	PP, RG, PB, WS, WD, T, HR	mm, W/m ² , hPa, m/s, °, °C, %
Las Brisas	BRI	IDEAM	WS, WD, T, HR	m/s, °, °C, %
Pance	PAN	DAGMA	PP, RG, WS, WD, T, HR	mm, W/m ² , m/s, °, °C, %
Santa Lucia	SAN	IDEAM	WS, WD, T, HR	m/s, °, °C, %
Siloé	SIL	IDEAM	WS, WD, T, HR	m/s, °, °C, %
Universidad del Pacifico	UPA	IDEAM	PP	mm
Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira	UNP	Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira	PP, RG, PB, WS, WD, T, HR	mm, w/m ² , hPa, m/s, °, °C, %
Universidad del Valle	UVA	IDEAM	PB, WS, WD, HR	hPa, m/s, °, %
Zaragoza	ZAR	IDEAM	PB, WS, WD, T, HR	hPa, m/s, °, °C, %

Fuente: Elaboración propia.

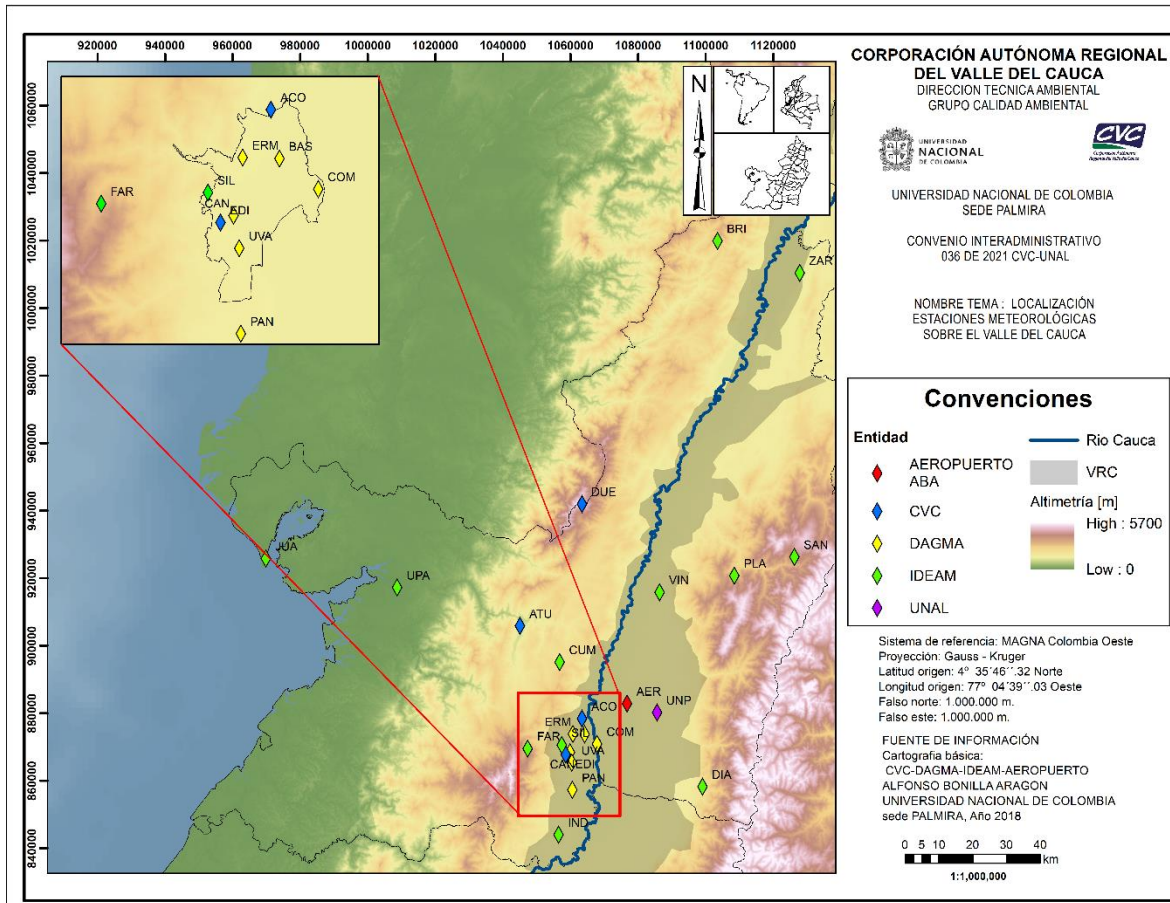


Figura 1. Ubicación de estaciones meteorológicas con información horaria, obtenida para análisis en el VRC
Fuente: Elaboración propia.

1.2.2. Procedimientos de depuración

La depuración de datos meteorológicos se basó inicialmente en la inspección visual de las series temporales y posteriormente en la aplicación de diferentes procesos estadísticos. La inspección visual de los datos permitió identificar datos que pueden estar relacionados con fallas en los sensores, asimismo, brindó herramientas para establecer rangos de depuración típicos para cada una de las variables meteorológicas. Los rangos de depuración propuestos son resumidos en la Tabla 3, y establecen que variables por fuera de los mismos fueron objeto de depuración inicial de la información analizada en cada estación.

Tabla 3. Rangos de depuración inicial para las variables meteorológicas

Variable	Rango de depuración
Humedad relativa	0 % <= HR <= 100 %
Temperatura	0 °C < T < 50 °C
Precipitación	0 mm < PP

Variable	Rango de depuración
Radiación solar	$0 \text{ W/m}^2 < RG < 1300 \text{ W/m}^2$
Presión barométrica	$1013 \text{ hPa} < PB < 500 \text{ hPa}$
Velocidad y dirección del viento	$0^\circ < WD < 360^\circ$ $0 \text{ m/s} < WS$

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, mediante la inspección visual de las series temporales se pudo identificar fenómenos como el “clipping” en los registros de radiación solar. El *clipping* es un fenómeno en donde los sensores de radiación presentan un límite superior de detección inferior a la radiación recibida normalmente, por lo tanto, cuando se supera este límite el registro de los valores máximos obtenidos en el sensor reporta una forma típica de meseta, que no es consistente con el comportamiento diurno típico de la radiación solar. Para dar un ejemplo de este fenómeno, la Figura 2 muestra el perfil horario promedio de la radiación solar para dos estaciones de análisis sobre el VRC. En la estación AER se observa un comportamiento sin *clipping* donde los máximos de radiación se presentan alrededor del mediodía. De otra parte, en la estación ERA entre las 9 y 15 horas se observa un comportamiento de meseta asociado al fenómeno de *clipping*. Por lo tanto, estos datos entre las 9 y 15 horas fueron descartados.

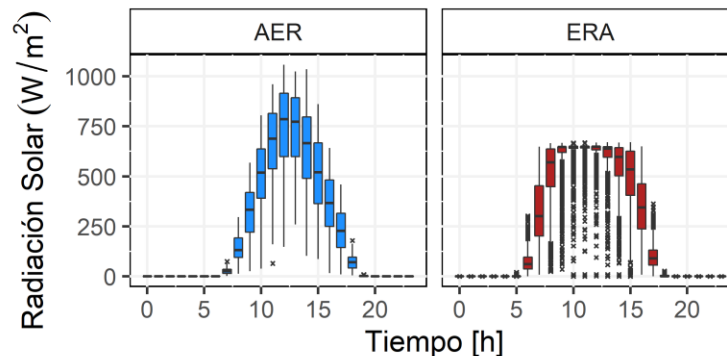


Figura 2. Perfil promedio horario de Radiación Solar en las estaciones AER y ERA durante 2018. Se observa el fenómeno de clipping en la radiación solar de la estación ERA

Fuente: Elaboración propia

Posterior al análisis visual, algunos registros que se encuentran dentro del rango de depuración inicial podrían considerarse como atípicos ya que no representan consistencia con el fenómeno físico asociado al comportamiento promedio horario de las variables, por lo tanto, la siguiente etapa correspondió a la depuración de datos meteorológicos basados en diferentes criterios estadísticos con el fin de identificar dichos registros atípicos. Se aplicaron criterios como: 1) Rangos alrededor de la mediana horaria. 2) Correlaciones lineales entre variables meteorológicas. 3) diagramas de dispersión como son los histogramas.

La Figura 3a muestra a manera de ejemplo el proceso llevado a cabo en la estación meteorológica del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (AER) para la variable temperatura ambiente. Aplicando el filtro de mediana para la serie de datos del perfil horario diurno, se

estableció un rango de temperatura de 4 desviaciones estándar (franja rosada) alrededor de la mediana de los datos (línea continua); los datos fuera de este rango se consideraron como datos atípicos. Este procedimiento también se realizó para radiación solar y presión barométrica. La Figura 3b muestra el proceso de depuración realizado para la humedad relativa en la estación VIN (Vínculo). A través de una correlación lineal entre la humedad relativa y la temperatura ambiente se pudo evidenciar que algunos valores se encuentran alejados de la nube de datos que permite establecer una correlación lineal con la temperatura (ver primer panel), por lo tanto, mediante un ajuste lineal con el método de mínimos cuadrados se estableció un rango óptimo alrededor de la correlación lineal, permitiendo considerar como valores válidos los datos más cercanos a la regresión (ver segundo panel). Por último, la Figura 3c muestra el procedimiento realizado para la velocidad del viento en la estación AER, procedimiento que también se realizó para la precipitación. Mediante la elaboración de diagramas de dispersión como los histogramas de frecuencias, se estableció un rango óptimo donde las velocidades típicamente se agrupan. En el primer panel se observan velocidades cercanas a los 60 m/s, las cuales son poco probables en el área de estudio, por lo tanto, se estable como rango óptimo velocidades entre los 0 y 10 m/s (segundo panel), obteniendo así un perfil de velocidades más cercano al comportamiento observado y esperado en cada estación de análisis.

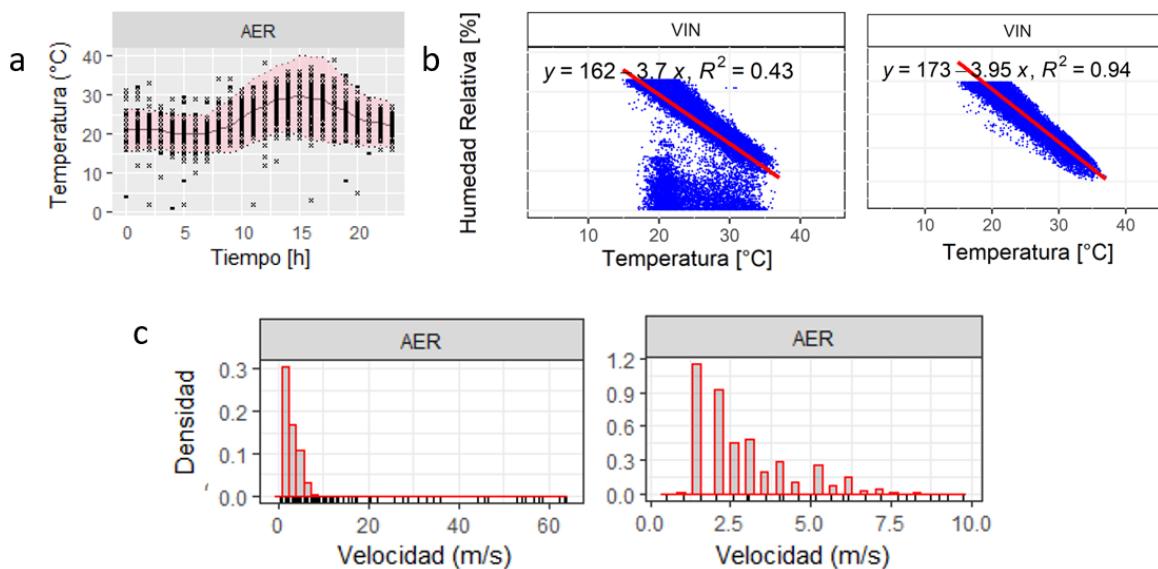


Figura 3. Esquemización del proceso de depuración de datos meteorológicos. a) Aplicación de filtros de mediana con un rango de 4 desviaciones estándar alrededor de la mediana horaria para temperatura. b) Correlación lineal entre la temperatura y la humedad relativa. c) Histogramas aplicados para la velocidad del viento

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que, en el procedimiento de depuración de datos para la velocidad y dirección del viento en superficie, algunas estaciones presentaban una resolución temporal de 10 minutos, por lo tanto, fue necesario llevar estos datos a una resolución horaria. El vector viento se promedió en una resolución horaria teniendo en cuenta sus

componentes zonales (eje x, oriente-occidente) y meridionales (eje y, norte-sur). Con respecto a los datos de velocidad y dirección del viento en altitud (radiosondeo), se estableció una segmentación vertical de 100 m como intervalo de altura, realizando en cada intervalo el mismo procedimiento anteriormente descrito para promediar los vientos en superficie.

Como parte de los resultados del proceso de depuración de datos meteorológicos, de los 4.6 millones de datos obtenidos entre 2010 y 2020, el 83% fueron considerados como válidos (Tabla 4). Las variables de radiación solar y vientos fueron las de menor porcentaje de datos válidos con un 62.4% y 74.4%, respectivamente. Este resultado se asocia principalmente a fenómenos identificados como el *clipping* para la radiación solar; y para los vientos, al ser un registro compuesto por velocidad y dirección, al considerarse uno de los dos como no válido, el dato asociado también se consideró como no válido. Otro de los factores que influyó para el descarte de datos fue el reporte de fallas de los sensores de monitoreo, como en las estaciones de COM y DUE, o la identificación de patrones atípicos como lo reportado en la estación Juanchaco (JUA), la cual finalmente no fue empleada en el análisis de patrones de circulación debido a su comportamiento poco confiable en los reportes de viento.

Tabla 4. Resultados del proceso de depuración de datos meteorológicos para el periodo 2010-2020 en las estaciones de análisis

Variable	Datos sin depurar	Datos depurados	Datos depurados [%]
Humedad relativa	1,149,446	898,388	78.2%
Temperatura	1,044,042	959,602	91.9%
Precipitación	609,853	609,853	100.0%
Radiación solar	198,966	124,094	62.4%
Presión barométrica	478,601	399,126	83.4%
Velocidad y dirección del viento (superficie)	1,166,460	867,315	74.4%
Velocidad y dirección del viento (Radiosondeo)	26,728	26,503	99.2%
Total	4,674,096	3,884,881	83.1%

Fuente: Elaboración propia

Como resultado del proceso de depuración de variables meteorológicas, se consolidó una base de datos meteorológicos en formato .csv. Esta base de datos contiene un documento asociado, donde en una primera parte se presenta la información básica relacionada, por ejemplo, el proceso de depuración, notación de variables, unidades de medida y evaluación de la calidad de los datos (a saber, L1 que significa que el dato requiere una revisión, y L2 que el dato ha sido validado). En la segunda parte se describe información general de cada estación, incluyendo nombre completo, abreviatura del nombre, ubicación (coordenadas Norte, Este y altitud), entidad responsable y variables monitoreadas. Los registros de cada variable en la base de datos se estructuraron de la siguiente forma: en una primera columna se presenta la resolución temporal de los datos, la siguiente columna muestra la abreviatura de la estación, en una tercera columna denominada "parámetro" se muestran las variables meteorológicas. La cuarta columna muestra el valor de cada variable sin depurar, la quinta columna muestra el dato obtenido del proceso de depuración y la última columna muestra

la calidad de los datos, según la notación L1 y L2. En el Anexo 1 se incluye la base de datos final obtenida.

1.2.3. Análisis de patrones de circulación atmosféricos sobre el VRC

El presente informe se centra en el análisis de los patrones de circulación de vientos en el VRC, destacando que el análisis de las demás variables meteorológicas en superficie como temperatura, humedad relativa, radiación solar, precipitación y presión barométrica, además del análisis de las variables en altitud de los radiosondeos está disponible en el documento “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021”.

Estudios previos han propuesto la influencia que tienen los vientos provenientes del Pacífico y la compleja topografía que envuelve el VRC, como factores de importancia en el comportamiento de la circulación atmosférica en el VRC. Según (López & Howell, 1967), el efecto de barrera topográfica que ejerce la cordillera Central frente a los vientos provenientes del oriente hace que sobre el VRC en horas de la tarde ingresen vientos de mayor intensidad a los generados al interior del VRC, ventilando el Valle de occidente a oriente. Estos vientos del atardecer, conocidos como la marea del Pacífico, son influenciados por el chorro de bajo nivel del Chocó, y viajan desde océano Pacífico cargados de humedad hasta llegar a la costa Pacífica colombiana (Yepes et al., 2019). Estos vientos ascienden alrededor del mediodía sobre la cordillera Occidental, llegando al paso de menor altitud entre el Parque Nacional Natural (PNN) Los Farallones (ubicado a la altura de Cali) y el cerro Calima (ubicado a la altura del municipio de Buga). Desde allí los vientos descienden sobre la vertiente oriental de la cordillera Occidental, ventilando al VRC desde el occidente. La intensidad de los vientos provenientes del océano Pacífico varía de intensidad durante el año y según la presencia de fenómenos sinópticos como el ENSO. Durante el año la mayor intensidad del chorro de bajo nivel del Chocó se observa durante los periodos de mayor presencia de precipitaciones en la región, en marzo-abril y septiembre-noviembre (Yepes et al., 2019).

El análisis de vientos realizado en las diferentes estaciones meteorológicas permitió evidenciar la influencia que los cambios en la altitud de la cordillera Occidental y el efecto que la marea del Pacífico tiene sobre los patrones de circulación atmosférica al interior del Valle. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las velocidades y direcciones del viento promedio horario durante septiembre de 2018, en las diferentes estaciones organizadas por su ubicación en sentido norte - sur. En las estaciones ubicadas a la misma latitud del paso de menor altitud de la cordillera Occidental, como lo son las estaciones de AER, UNP, ACO y SIL, se observa un cambio de dirección desde alrededor de las 14-15 horas hasta las 21 horas con vientos provenientes del noroccidente, siendo estos vientos de mayor intensidad con respecto a los reportados durante resto del día con valores por encima de los 4 m/s. Durante el resto del día predominan vientos del norte y oriente con velocidades cercanas a los 2 m/s. Las estaciones ubicadas sobre la cordillera Central, o relativamente cerca, como DIA, SAN, PLA, VIN y ZAR; y FAR sobre la cordillera occidental, muestran un comportamiento condicionado por fenómenos orográficos de valle-montaña montaña-valle, donde en las primeras horas del día hay un ascenso de masas de

aire hacia la montaña y en la tarde-noche las masas de aire frías descienden desde la montaña hacia el valle.

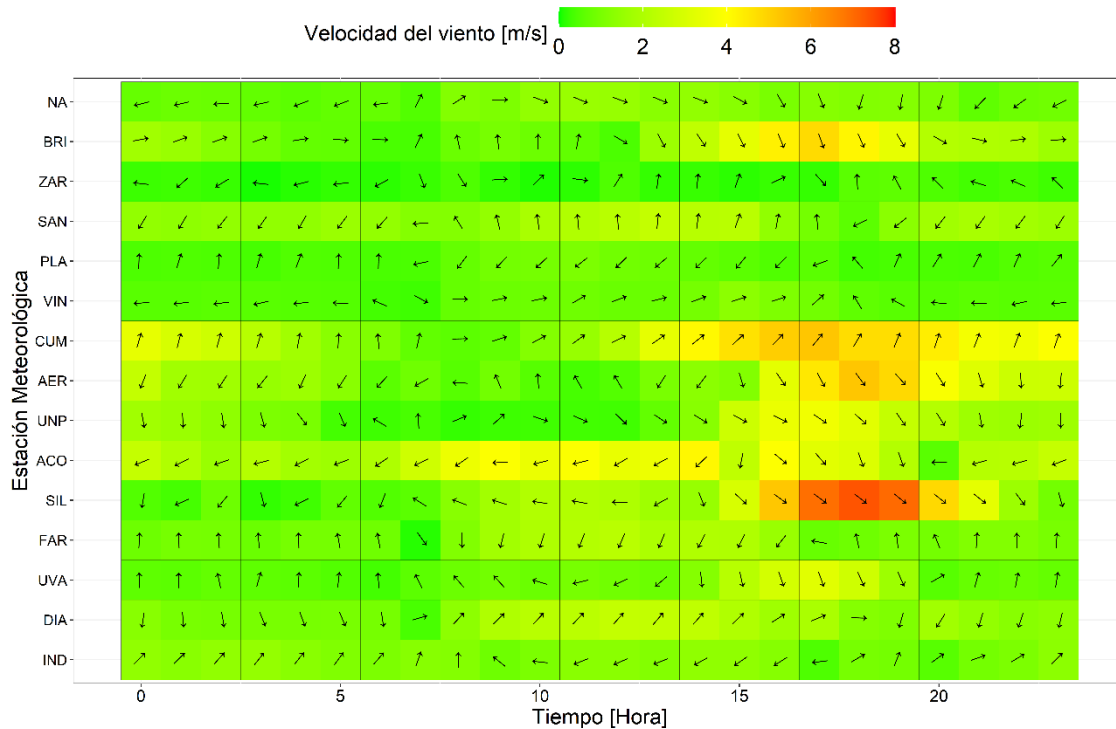


Figura 4. Velocidad y dirección promedio horario del viento en cada estación sobre el VRC durante septiembre de 2018
Fuente: Elaboración propia

Las demás estaciones muestran un comportamiento diferencial a lo largo del día, por ejemplo, en la estación de CUM ubicada sobre el paso de menor altitud de la cordillera Occidental y BRI al norte del VRC sobre la cordillera Occidental, muestran velocidades provenientes del oriente-suroriente en CUM y oriente-nororiente en BRI, siendo más intensos al atardecer mostrando la influencia de los vientos provenientes desde la costa Pacífica. Hacia el sur del VRC, en las estaciones de IND y UVA se observa durante la mañana como predominan los vientos del suroriente, sin embargo, en la tarde en UVA se observa un cambio de dirección con vientos provenientes desde noroccidente.

La barrera topográfica que ejerce la cordillera Central frente a los vientos bajos del este, condiciona el VRC a fenómenos locales de circulación y aquellos que se originan en el océano Pacífico. Al analizar las mediciones de radiosondeos realizados en la mañana, cuando el efecto de la marea del Pacífico no es evidente, se podría decir que los vientos medidos obedecen a fenómenos predominantemente locales. El perfil vertical de los vientos obtenido de información de radiosondeos durante 2018 en el aeropuerto ABA y presentado en la Figura 5, sugiere que los vientos entre la superficie (~1000 msnm) y la mayor altura de la cordillera Central en este punto (~3000 msnm), provienen principalmente del oriente y suroccidente. Una vez superada la barrera de la cordillera Central, los vientos alisios del

este impulsados por la celda de convergencia de Walker predominan (López & Howell, 1967; Mesa-Sánchez & Rojo-Hernández, 2020).

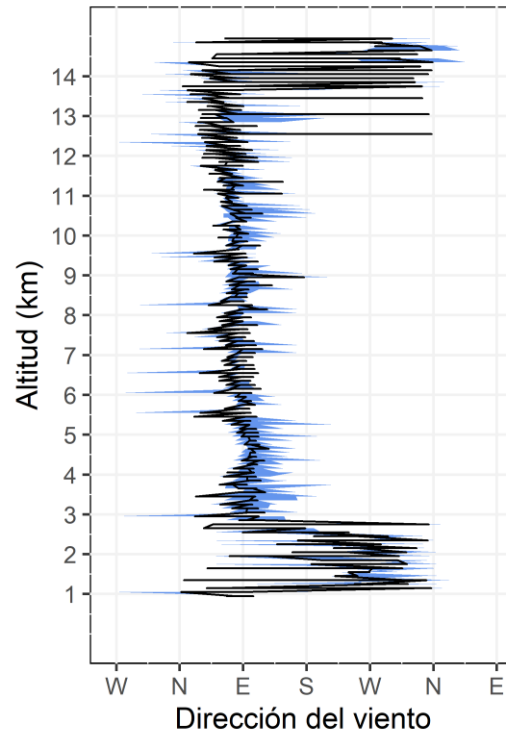


Figura 5. Perfil vertical de la dirección del viento para el 2018 sobre el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón. La línea negra representa la dirección promedio anual y la franja azul representa la desviación estándar de la dirección del viento.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de dirección y velocidades del viento descritos, junto con la simulación meteorológica realizada en la vigencia 2021 del presente proyecto, permitió sugerir dos modelos conceptuales de circulación sobre el VRC, los cuales permiten comprender posibles dinámicas de transporte regionales. El primer modelo representa el comportamiento de los vientos durante el periodo de mayor influencia de la marea del Pacífico, es decir, en horas de la tarde; el segundo modelo representa el comportamiento de los vientos durante el resto del día (Figura 6).

Durante el periodo de mayor intensidad de la marea del Pacífico - desde las 14-15 horas hasta las 21 horas (Figura 6a), los vientos ingresan al VRC por el paso de menor altitud en la cordillera Occidental, ventilando al Valle del noroccidente al suroriente predominantemente. A la altura del municipio de Tuluá, una parte de los vientos se dirige hacia el norte del VRC y la otra parte hacia el sur, generando un recorrido de vientos al interior del VRC de norte a sur. Hacia el sur del VRC se curvan los vientos hacia el occidente y norte, generando una región con vientos provenientes de múltiples direcciones sobre la ciudad de Cali. Durante el resto del día (Figura 6b) vientos de menor intensidad en comparación con el periodo de marea provienen del norte del VRC, al llegar al sur estos se

curvan y ventilan en dirección suroccidente el VRC a la altura de los municipios de Cali y Jamundí.

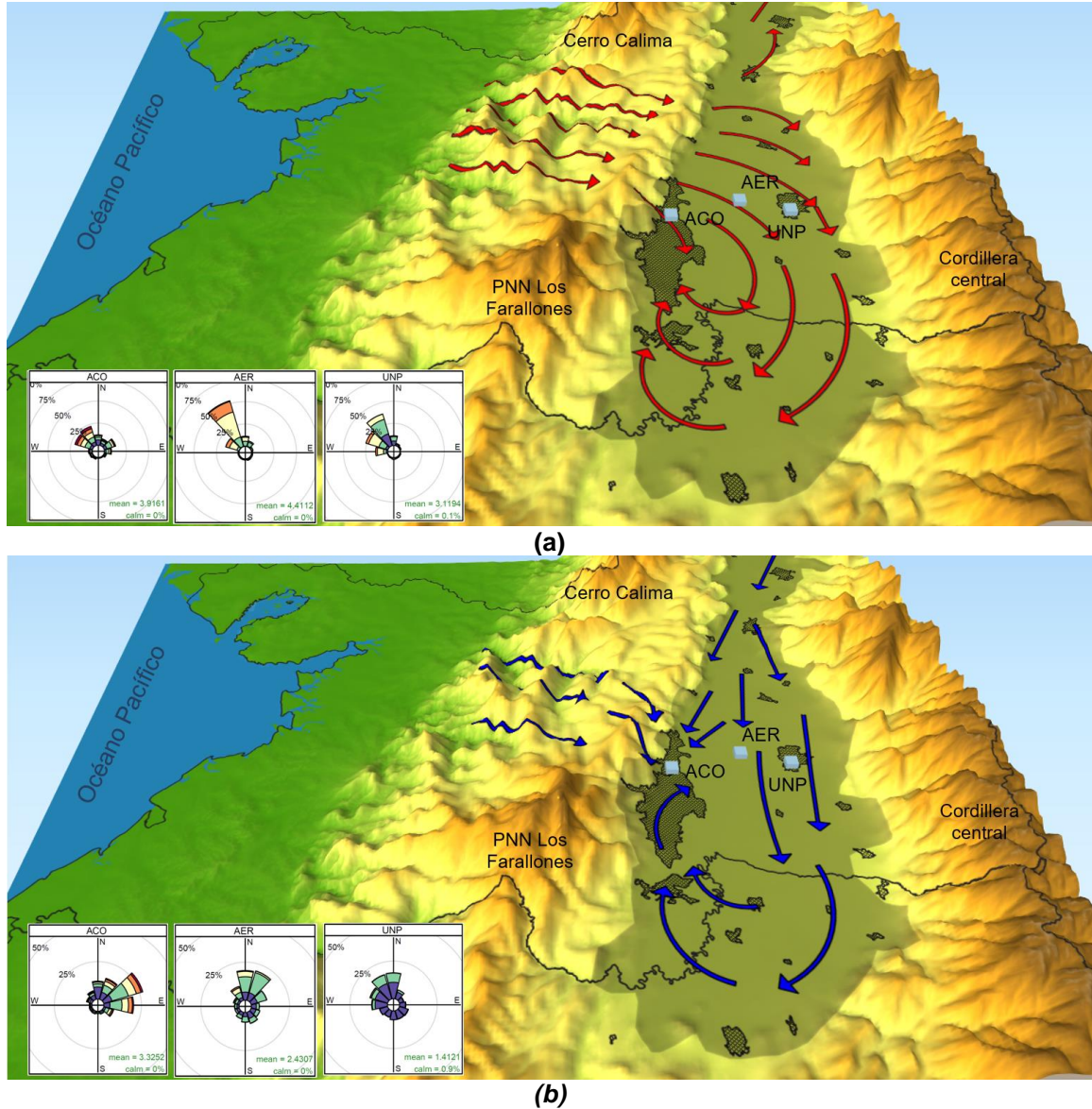


Figura 6. Modelo conceptual de patrones de circulación atmosféricos en el VRC. a) Periodo bajo la influencia de la marea del Pacífico. b) Periodo sin la influencia de la marea del Pacífico.

Fuente: Elaboración propia.

1.3. DEPURACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Dentro del VRC se encuentran importantes centros poblados como Cali, Palmira, Tuluá, Jamundí y Cartago, así como importantes centros industriales localizados en Yumbo, la zona franca de Palmaseca y la zona franca del Cauca, los cuales se han desarrollado junto con los ingenios azucareros y pueden generar presión sobre las condiciones de calidad del

aire, por las emisiones de contaminantes atmosféricos que se derivan de las actividades productivas asociadas no solo en términos de emisiones por fuentes estacionarias, sino también por fuentes móviles, por ejemplo asociadas al transporte de carga. En 2018, para el municipio de Yumbo, considerado como uno de los centros industriales más importantes de Colombia, se presentaron concentraciones promedio anuales de PM_{10} en dos de sus estaciones ACOPI y Las Américas, cercanas a los 72 y $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (CVC, 2019). Para 2019 en ACOPI y Las Américas, las concentraciones promedio anuales fueron de 108 y $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. De otra parte, en el municipio de Palmira las estaciones Móvil Palmira y Palmira registraron concentraciones promedio de PM_{10} con valores de 23 y $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (CVC, 2019). Los registros reportados en Yumbo estuvieron por encima de la norma nacional anual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - Resolución 2254 de 2017), mientras que los reportes en ambos municipios estuvieron por encima de las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud -OMS- para promedios anuales de PM_{10} de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2021).

Si bien las emisiones por fuentes móviles y estacionarias tienen un impacto directo en la contaminación del aire, los procesos meteorológicos y la topografía influyen en los niveles de concentración en aire ambiente de los diferentes contaminantes atmosféricos (Pérez et al., 2020). Las concentraciones de material particulado están inversamente relacionadas con la velocidad del viento, ya que altas velocidades favorecen la dispersión horizontal de contaminantes. De otra parte, las concentraciones de un contaminante secundario como el ozono troposférico (O_3) están correlacionados positivamente con la temperatura y radiación solar, condiciones que favorecen su formación por efecto de reacciones fotoquímicas y negativamente con la humedad relativa (Ma et al., 2019).

Condiciones particulares como una baja temperatura y velocidad del viento horizontal propician episodios de contaminación local sobre ciertas regiones, ya que se promueven condiciones de estabilidad atmosférica. En el caso de la presencia de precipitación, se favorecen fenómenos de remoción de contaminantes atmosféricos como el material particulado y una alta humedad relativa puede favorecer la formación de partículas secundarias (Stirnberg et al., 2021).

Dentro de las actividades realizadas en desarrollo del Convenio, se llevó a cabo la depuración y análisis de información de calidad del aire obtenida de estaciones de monitoreo que se encuentran sobre el VRC, con enfoque principal en contaminantes como el material particulado. Es importante destacar que el análisis de información de calidad del aire cubrió estaciones de monitoreo ubicadas sobre diferentes municipios del VRC. El proceso de adquisición de datos y fuentes de información de calidad del aire se describen en detalle en el informe “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021”. El análisis de información tuvo en cuenta contaminantes atmosféricos como el material particulado menor a $10 \mu\text{m}$ de diámetros (PM_{10}), material particulado menor a $2.5 \mu\text{m}$ de diámetro ($PM_{2.5}$), ozono troposférico (O_3), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2). Teniendo en cuenta que los municipios de Yumbo y Palmira son la zona de análisis principal del Convenio, en el presente informe se realiza un análisis del comportamiento del contaminante material particulado medido en estaciones en superficie ubicadas en Yumbo

y Palmira. Se realiza inicialmente una descripción general de los procesos de depuración de información llevados a cabo.

1.3.1. Procedimiento de depuración de datos de calidad del aire obtenidos en estaciones de monitoreo del VRC

La información de contaminantes del aire medidos en estaciones de monitoreo ubicadas sobre el VRC fue obtenida de distintas entidades, con un cubrimiento temporal diverso en función de la estación, en términos generales se cuenta con registros entre los años 2013 a 2020. La Tabla 5 y Figura 7 muestran la ubicación, entidad responsable, abreviaturas usadas y contaminantes atmosféricos monitoreadas por cada una de las estaciones de monitoreo cuya información fue analizada.

Tabla 5. Estaciones de calidad del aire y contaminantes monitoreados sobre el Valle del Cauca

Entidad	Estación	Abreviación	Contaminante	Temporalidad
CVC	Móvil Palmira	MPAL-A	PM ₁₀ , CO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂	Horaria
CVC	Acopi	ACO-A	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Horaria
CVC	Candelaria	CAND-A	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Horaria
CVC	Jamundí	JAM-A	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Horaria
CVC	Tuluá	TUL-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂	Horaria
CVC	Buga	BUG-M	PM ₁₀	Diaria
CVC	Cascajal	CAS-M	PM ₁₀	Diaria
CVC	ECA Yumbo	YUM-M	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Diaria
CVC	ECA Yumbo	YUM-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂	Horaria
CVC	La Dolores	DOL-M	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Diaria
CVC	Las Américas	AME-M	PM ₁₀	Diaria
CVC	Palmira	PAL-M	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Diaria
CVC	Palmira	PAL-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, NO, NO ₂ , O ₃	Horaria
DAGMA	Base Aérea	BAS-A	PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂	Horaria
DAGMA	Compartir	COM-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃	Horaria
DAGMA	Ermita	ERM-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂	Horaria
DAGMA	Pance	PAN-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃	Horaria
DAGMA	Univalle	UVA-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , NO ₂ .	Horaria
DAGMA	Cañaveralejo	CAN-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂	Horaria
DAGMA	ERA	ERA-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂	Horaria
DAGMA	Flora	FLO-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂	Horaria
DAGMA	Transitoria	TRA-A	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂	Horaria
Cenicaña	Candelaria	CAND-C-A	PM ₁₀	Horaria
Cenicaña	Cerrito	CER-C-A	PM ₁₀	Horaria
Cenicaña	Tuluá	TUL-C-A	PM ₁₀	Horaria

M: Estación Manual. A: Estación Automática. C: Estación Cenicaña

Fuente: Elaboración propia.

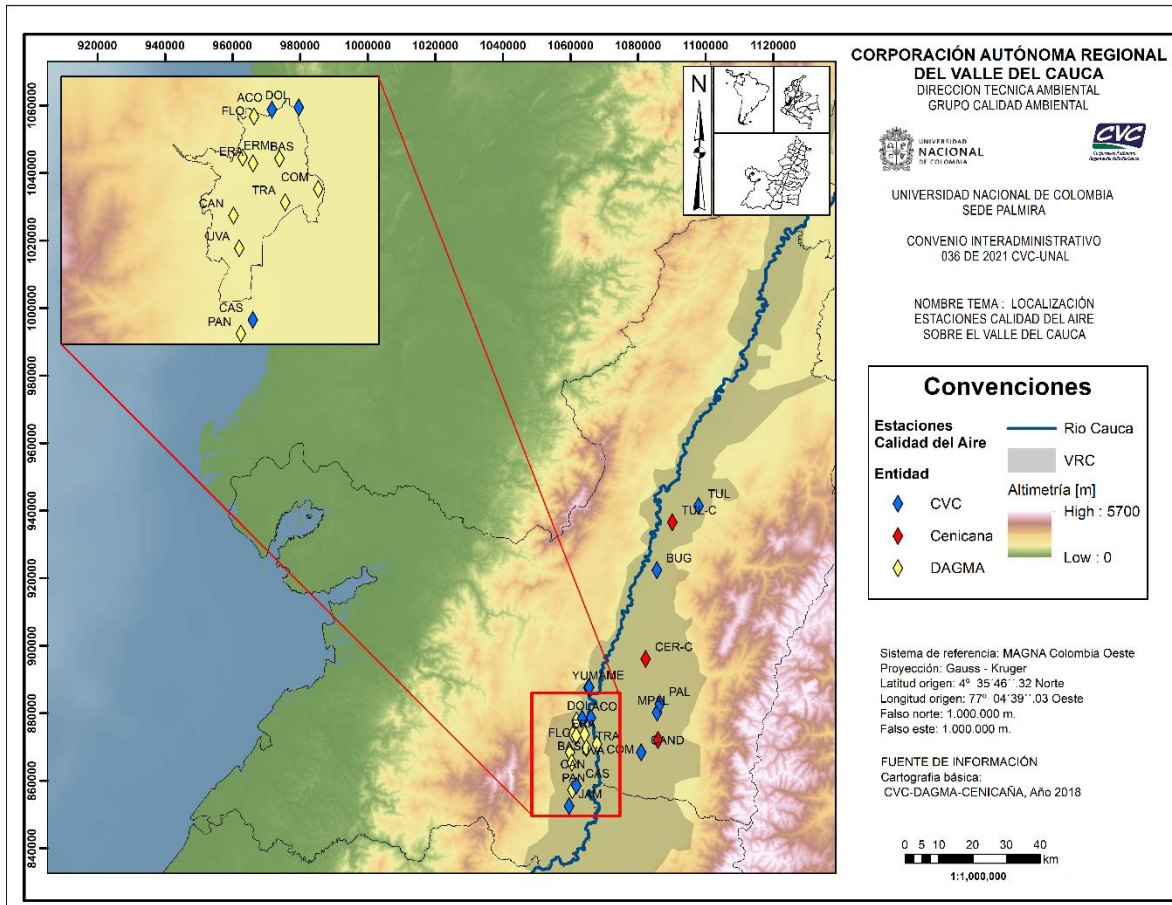


Figura 7. Localización estaciones de calidad del aire analizadas sobre el Valle del Cauca
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de depuración de datos de calidad del aire inició con la observación del comportamiento de las series temporales. Dicho proceso permitió identificar patrones inusuales que se consideran atípicos como lo pueden ser alteraciones de la línea base de mediciones, datos repetidos o negativos, periodos prolongados sin captura de datos, entre otros fenómenos.

Las alteraciones de la línea base de medición se conocen como deriva (*drift* en inglés). La deriva se refiere a un cambio gradual en la respuesta de un sensor a lo largo del tiempo, esto puede llevar a concluir erróneamente que las concentraciones han aumentado o disminuido con el tiempo, siendo más frecuente en monitores de gases (óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre). La deriva puede ser positiva o negativa y puede ocurrir por diversos motivos. Una forma de reducir la desviación es calibrar el sensor con frecuencia (Artursson et al., 2000; Williams et al., 2014). Una vez presentada la deriva esta se puede corregir por diferentes métodos estadísticos, uno de ellos es usar las concentraciones que se usan para la calibración del equipo y ajustar las concentraciones según este parámetro.

En el presente proyecto, el método que se usó para esta corrección se centró en la observación de la serie temporal, donde se identifican los periodos de mayor estabilidad.

Estos periodos de estabilidad se tomaron como referencia para el ajuste de las lecturas con deriva. La Figura 8 muestra la identificación y corrección de la deriva para el contaminante NO en la estación TUL. El procedimiento detallado para la corrección de este fenómeno se encuentra descrito en el informe “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021” y en el documento Anexo 2 donde se encuentra la base de datos de calidad del aire con la información analizada y depurada.

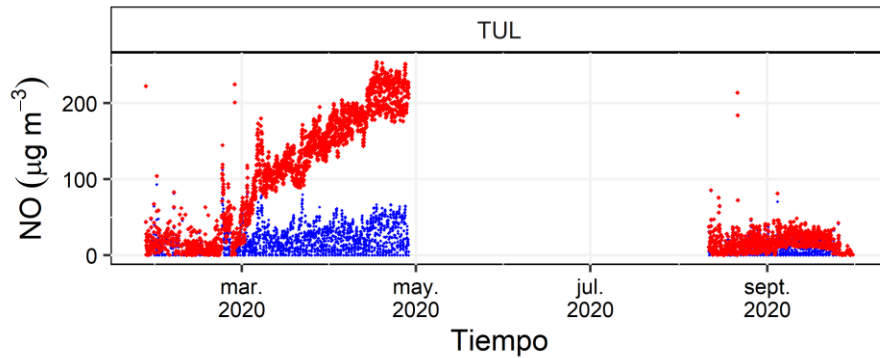


Figura 8. Identificación (puntos rojos) del fenómeno de deriva y corrección (puntos azules) para concentraciones de monóxido de nitrógeno (NO) en la estación TUL
 Fuente: Elaboración propia.

Una vez identificado y corregido el fenómeno de deriva, se continuó con la inspección visual de las series temporales con el fin de identificar patrones inusualmente repetidos o periodos prolongados sin captura de datos, como se ejemplifica en las Figura 9 y Figura 10. Los datos inusualmente repetidos se consideraron como atípicos, mientras tanto, los periodos sin captura de datos son un indicador de desempeño de las estaciones en el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).

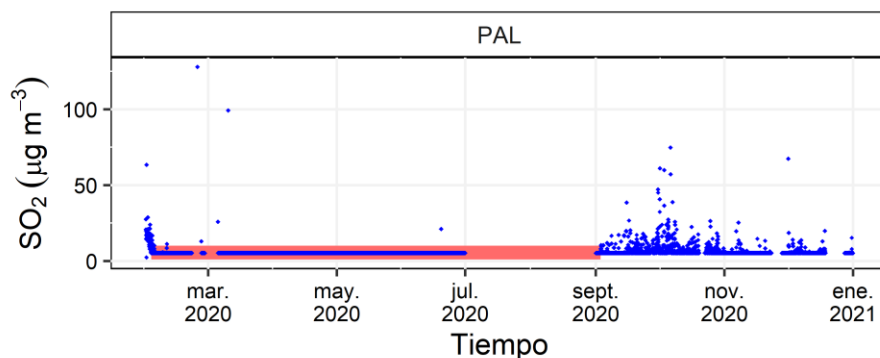


Figura 9. Identificación de datos inusualmente repetidos (franja rosa) para dióxido de azufre (SO₂) en la estación PAL
 Fuente: Elaboración propia.

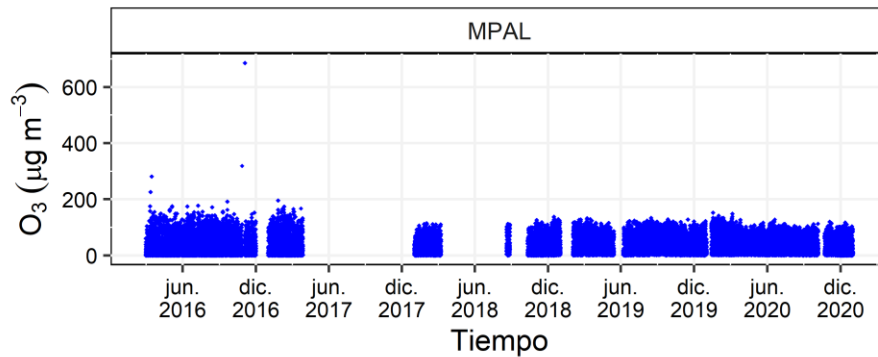


Figura 10. Identificación de periodos sin captura de datos para el ozono troposférico (O_3) en la estación MPAL

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a la identificación de patrones inusuales en las series temporales, se continuó con la inspección visual de las series temporales con el fin de identificar aquellos datos que se alejan del conjunto de datos, es decir, datos que están por encima o por debajo del comportamiento histórico de la estación o definido estadísticamente a partir de un intervalo de confianza. Estos datos pueden ser producto de fallas en los sensores de monitoreo o generados por un evento particular de contaminación a corto plazo como por ejemplo, un incendio (IDEAM, 2019). Por lo tanto, una vez identificado el dato inusual se debe realizar un análisis complementario que permita tener un contexto del origen de este dato y calificarlo o no como dato atípico.

Para la identificación de estos datos, se estableció un rango estadístico de depuración de 3σ (3 desviaciones estándar) alrededor de las concentraciones promedio horarias para cada contaminante y estación, lo que es equivalente a que el 99.7% de los datos de la serie temporal son válidos. La Figura 11 muestra el procedimiento realizado para el PM_{10} en la estación ACO, donde inicialmente se presentan concentraciones horarias que llegan a los $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentraciones que se podrían considerar como atípicas. Por lo tanto, se establece un rango (línea azul punteada) alrededor del promedio de los datos (línea azul continua), lo cual permitió considerar como datos atípicos a las concentraciones superiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

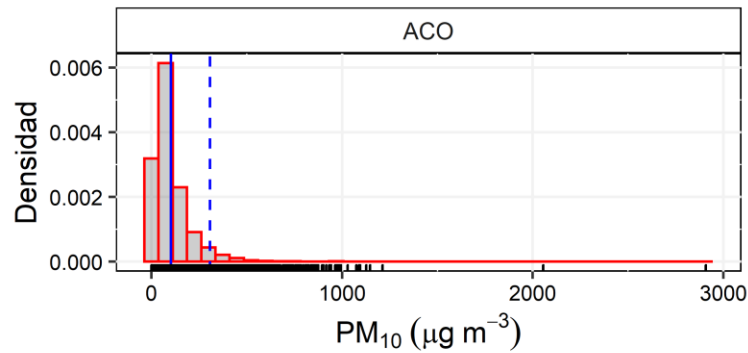


Figura 11. Proceso de identificación de datos considerados como atípicos para el PM_{10} en la estación ACO. La línea continua azul representa el promedio horario y la línea azul intermitente representa 3 desviaciones estándar por encima del promedio horario.
Fuente: Elaboración propia.

Como complemento al análisis del comportamiento temporal para cada contaminante, se realizó una comparación teniendo en cuenta los niveles máximos permisibles establecidos en la resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), lo cual permite identificar el número y porcentaje de excedencias para cada contaminante y estación. El resultado de este análisis se encuentra en el documento “Estado de la red del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)”, elaborado como parte del presente Convenio.

Una vez culminado el proceso de depuración, se realizó un análisis de datos válidos según lo establecido en el “Manual de diseño de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del 2010 (MAVDT, 2010), donde se establece como el límite inferior el 75% de datos válidos (criterio de representatividad), entendiéndose datos válidos como la relación entre los datos obtenidos del proceso de depuración y los datos que el sistema debió capturar durante el periodo de análisis (diario o anual). La Tabla 6 muestra el número de datos capturados, el número de datos válidos y la representatividad (datos válidos/datos que debieron ser capturados) para las estaciones de la CVC entre el periodo 2016 y 2020, mostrando que en promedio el SVCA se encuentra por debajo del límite sugerido del 75%, con un 67% en promedio, siendo el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de carbono (CO₂) con un 36% y 48%, respectivamente, los contaminantes de menor representatividad. El análisis de desempeño del SVCA de la CVC por año, contaminante y estación; y las recomendaciones operativas se encuentran a detalle en el documento “Estado de la red del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)”.

Sumado a lo anterior, como resultado de la consolidación de datos de calidad del aire se construyó una base de datos en formato .csv. Esta base de datos contiene un documento asociado, donde en una primera parte se presenta información básica, por ejemplo, el proceso de depuración, notación de los contaminantes, unidades de medida y evaluación de la calidad de los datos (L1 que significa que el dato requiere una revisión y L2 que el dato ha sido validado). En la segunda parte se describe información general de cada

estación, incluyendo nombre completo, abreviatura del nombre, ubicación (coordenadas Norte, Este y altitud), entidad responsable y contaminantes monitoreados. La base de datos se estructuró de la siguiente forma: en una primera columna se presenta la resolución temporal de los datos, la siguiente columna muestra la abreviatura de la estación, en una tercera columna se muestra el contaminante. Los valores numéricos se registran desde la cuarta columna, que muestra el valor de cada contaminante sin depurar o corregir, la quinta columna muestra el dato obtenido del proceso de depuración y la última columna muestra la calidad de los datos, en función de la notación L1 y L2. En el Anexo 2 se incluye la base de datos final obtenida.

Tabla 6. Número de datos capturados, datos válidos y representatividad para los diferentes contaminantes atmosféricos monitoreados por la CVC entre el 2016 y 2020

Contaminante	Número de datos capturados	Numero de datos Validos	Representatividad [%]
CO	11,390	11,337	64.71
CO ₂	8,448	8,415	48.03
NO	13,041	12,866	36.72
NO ₂	100,095	99,855	56.99
O ₃	340,587	340,340	69.38
PM ₁₀	693,739	691,321	74.45
PM _{2.5}	275,829	275,094	64.09
SO ₂	212,608	202,613	59.31
Total	1,655,737	1,641,841	67.42

Fuente: Elaboración propia

1.3.2. Análisis de información de calidad del aire

El análisis para el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) del presente informe se enfocó en las estaciones del SVCA ubicadas en los municipios de Yumbo y Palmira descritos en la Tabla 7 y cuya ubicación se presenta en la Figura 12. Se realizó un análisis de los perfiles promedio anuales, semanales, mensuales y horarios. El análisis de material particulado para las demás estaciones y el análisis gráfico para los demás contaminantes se encuentra disponible en el documento “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021”.

Tabla 7. Estaciones del SVCA de la CVC ubicados sobre los municipios de Palmira y Yumbo.

Municipio	Estación	
Yumbo	Acopi (ACO-A)	Yumbo (YUM-A)
	Américas (AME-M)	Yumbo (YUM-M)
Palmira	UNAL Sede Palmira (MPAL-A)	Palmira (PAL-A)
	Dolores (DOL-M)	Palmira (PAL-M)

Fuente: Elaboración propia

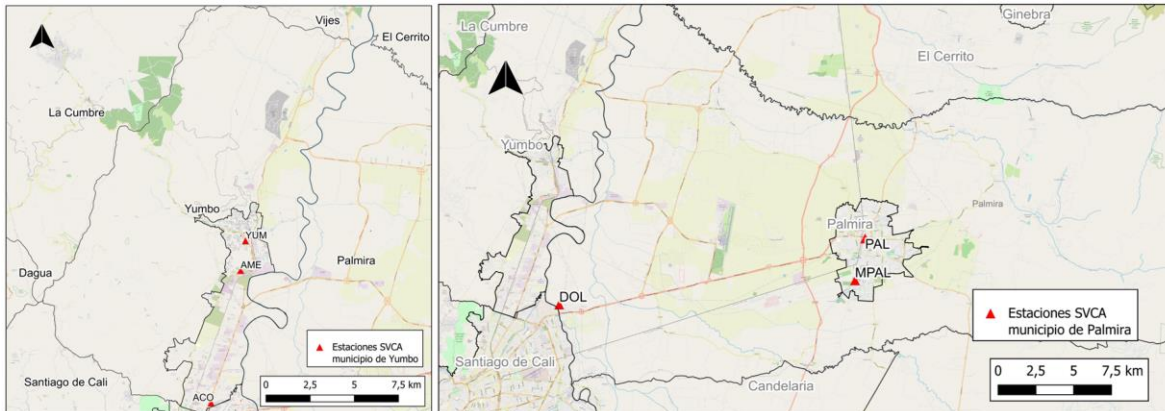


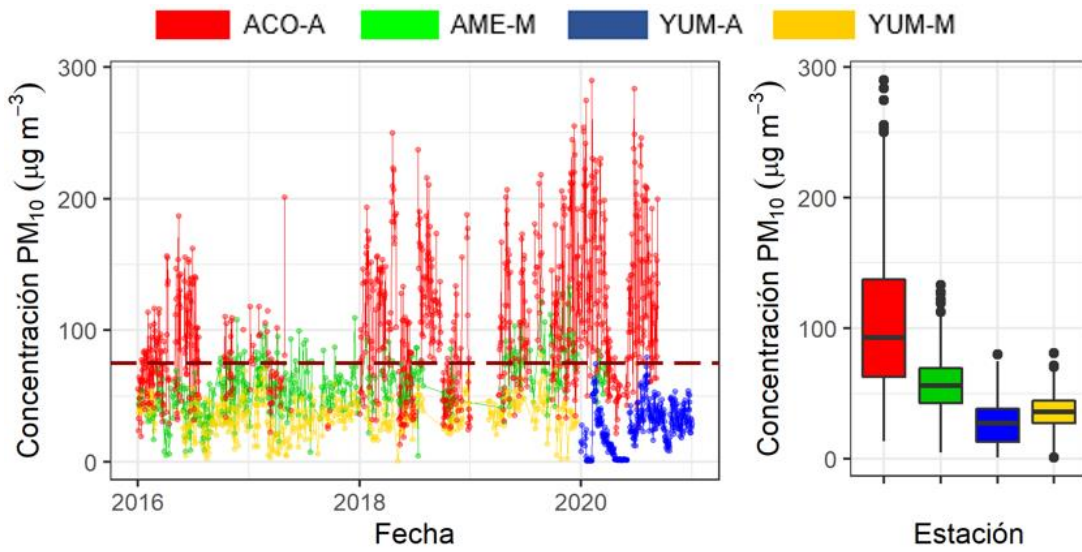
Figura 12. Ubicación de las estaciones del SVCA de la CVC en a) Municipio de Yumbo. b) Municipio de Palmira

Fuente: Elaboración propia.

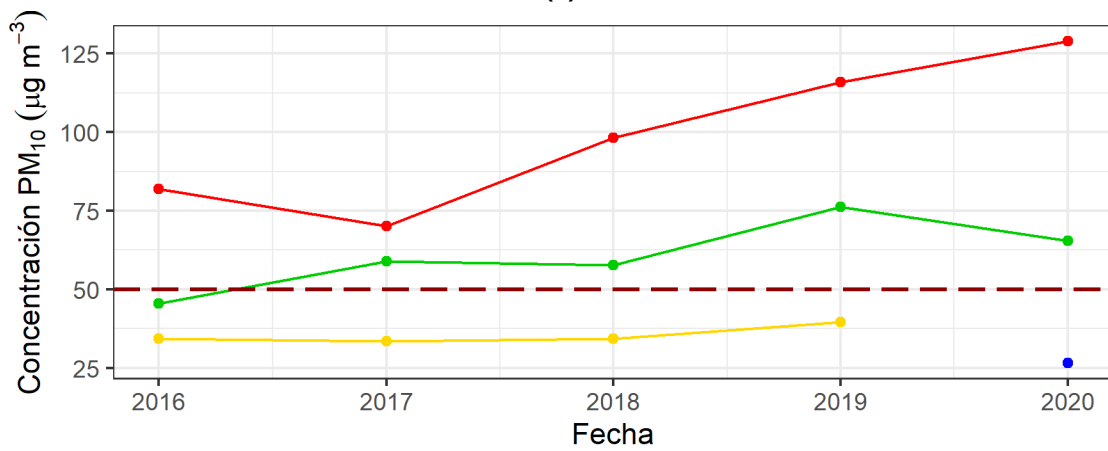
1.3.3. Comportamiento del material particulado en el municipio de Yumbo

La Figura 13 muestra el comportamiento del contaminante PM_{10} para diferentes ventanas temporales según los registros de las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo. La estación ACO-A, ubicada en el sector industrial de Acopi al sur del municipio, muestra como las concentraciones anuales se han incrementado progresivamente, para el 2016 estaban en $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ llegando a los $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2020. Esta estación se encuentra expuesta a fenómenos locales de contaminación como la resuspensión de material particulado, fenómeno asociado con el estado de las vías circundantes y el paso constante de vehículos pesados. En la estación AME-M, ubicada en un sector con influencia industrial, residencial y comercial, también se observa una tendencia creciente pasando de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 2016 a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2019; sin embargo, en 2020 se evidencia una ligera disminución llegando a los $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la estación YUM, ubicada sobre el centro urbano del municipio, se presenta un leve incremento pasando de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 2016 a $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2019. Se destaca en esta última estación que, al cambiar a una tecnología de monitoreo automático y sumado a la disminución de actividad debido a la pandemia del Covid-19, las concentraciones han disminuido considerablemente hasta los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como se observa en los registros de YUM-A.

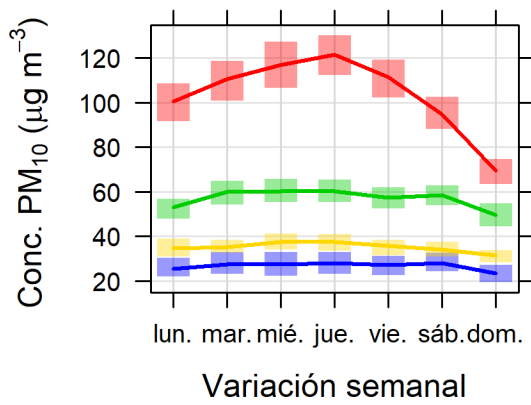
De otra parte, la Figura 14 muestra el comportamiento del $PM_{2.5}$ en las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo. La estación YUM-A tan solo reporta concentraciones para el 2020 con registros que están alrededor de los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras tanto, en la estación ACO-A las concentraciones están alrededor de los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, donde el año con mayores concentraciones fue 2017 registrando en promedio $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas concentraciones se asocian principalmente al efecto del sector industrial y al transporte asociado, ya que el municipio de Yumbo es uno de los principales centros de desarrollo industrial del Valle del Cauca, donde se ubican alrededor 500 industrias. Este fenómeno en conjunto con una deficiente malla vial (Betancur, 2015), tiene una influencia importante en la contaminación del aire registrada en el sector industrial de Acopi, donde se ubica la estación de ACO, derivando en el registro de concentraciones elevadas.



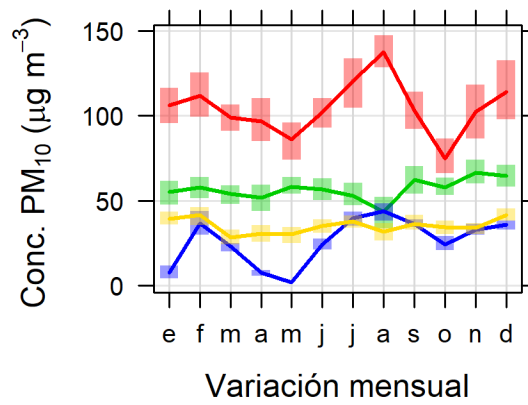
(a)



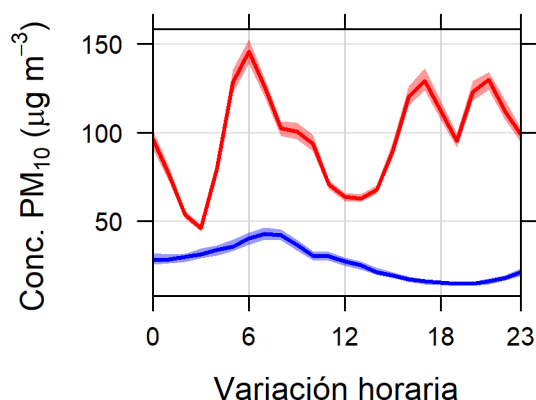
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 13. Comportamiento del PM_{10} en las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario

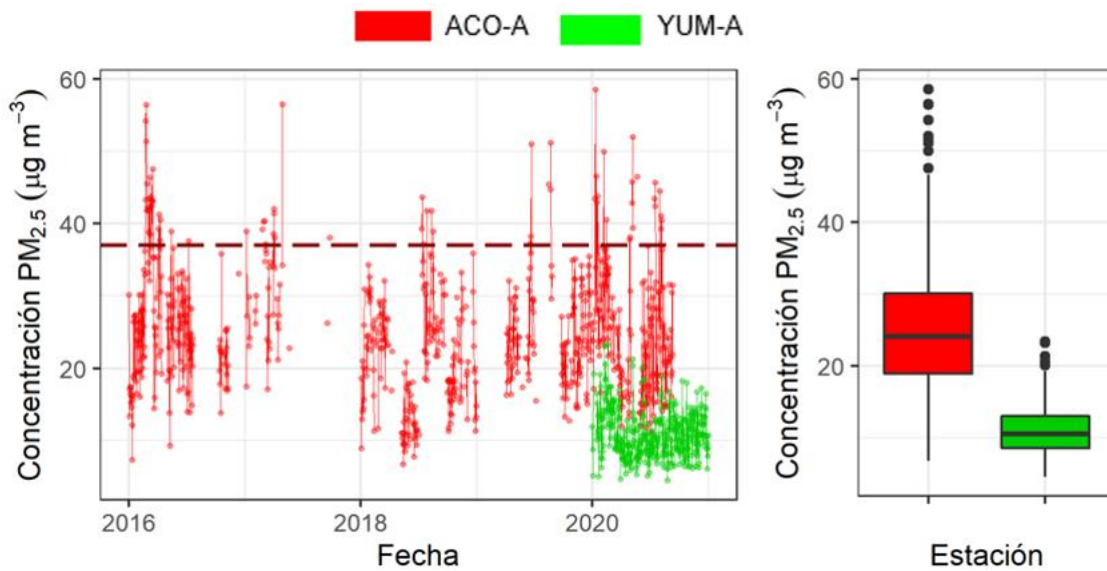
Fuente: Elaboración propia

El perfil de concentraciones promedio en función de los días de la semana muestra en general que los fines de semana las concentraciones son más bajas que los días laborales, mostrando una relación directa entre las concentraciones y la actividad del municipio. Lo anterior coincide con el perfil de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el cual las mayores concentraciones se presentan los jueves con valores cercanos a los 120 y 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en ACO-A, disminuyendo hasta los 70 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el domingo respectivamente.

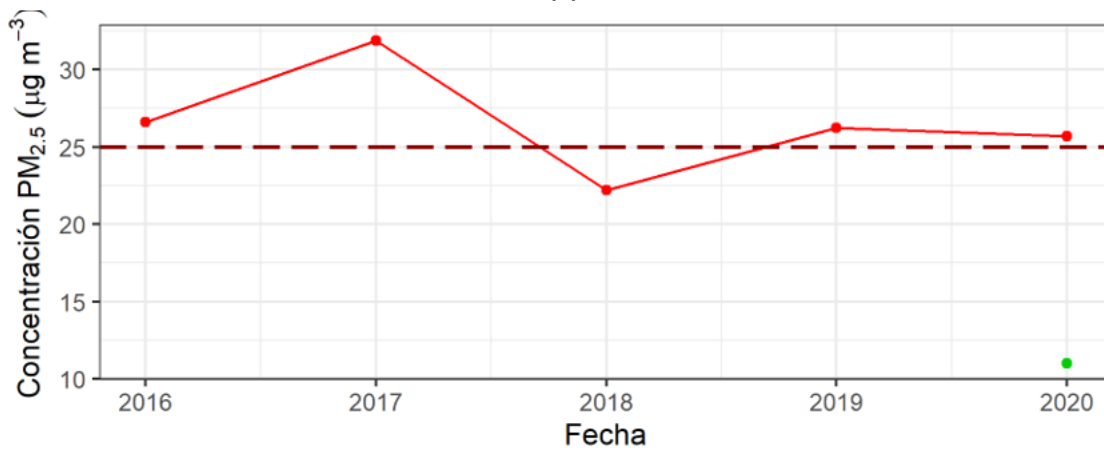
Durante el año las concentraciones se relacionan indirectamente con las precipitaciones sobre la región, donde los periodos de abril-mayo y octubre-noviembre asociados con periodos de mayores lluvias muestran menores concentraciones. Para las estaciones YUM-A y ACO-A se observan dos periodos de altas concentraciones, el primero en febrero y el segundo en agosto asociados a los periodos considerados como tiempo seco. En ACO-A las concentraciones promedio mensuales oscilan entre los 150-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. En YUM-A se tienen registros entre los 10-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y 8-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. La estación AME-M presenta concentraciones de PM_{10} entre 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

De otra parte, los perfiles horarios obtenidos en las estaciones de ACO-A y YUM-A muestran un periodo de mayores concentraciones de PM_{10} alrededor de las 6 horas, siendo más alto en ACO-A donde se llega a los 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en YUM-A se registran valores cercanos a los 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En ACO-A se presenta un segundo periodo con picos de concentración entre las 15 y 21 horas donde las concentraciones llegan hasta los 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con un leve descenso a las 19 horas. Para el $PM_{2.5}$ las mayores concentraciones se presentan entre las 6 y 10 horas, incrementándose de nuevo alrededor de las 21 horas en la estación de ACO-A, con valores de concentración entre 18 y 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para la estación YUM-A, solo se presenta un periodo con mayores concentraciones alrededor de las 8 horas con valores cercanos a los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El comportamiento diurno de las concentraciones de material particulado en Yumbo se relaciona con la actividad del municipio, el cual reporta mayor actividad (en términos de industria principalmente) entre las 5 y 23 horas. El efecto de la marea del Pacífico sobre Yumbo sugiere el descenso de las concentraciones de material particulado, fenómeno que se observa en la estación ACO entre las 18-20 horas, así como el comportamiento de estaciones como YUM, donde la mayor intensidad en los vientos hace que las concentraciones del material particulado disminuyan en horas de la tarde y noche principalmente.



(a)



(b)

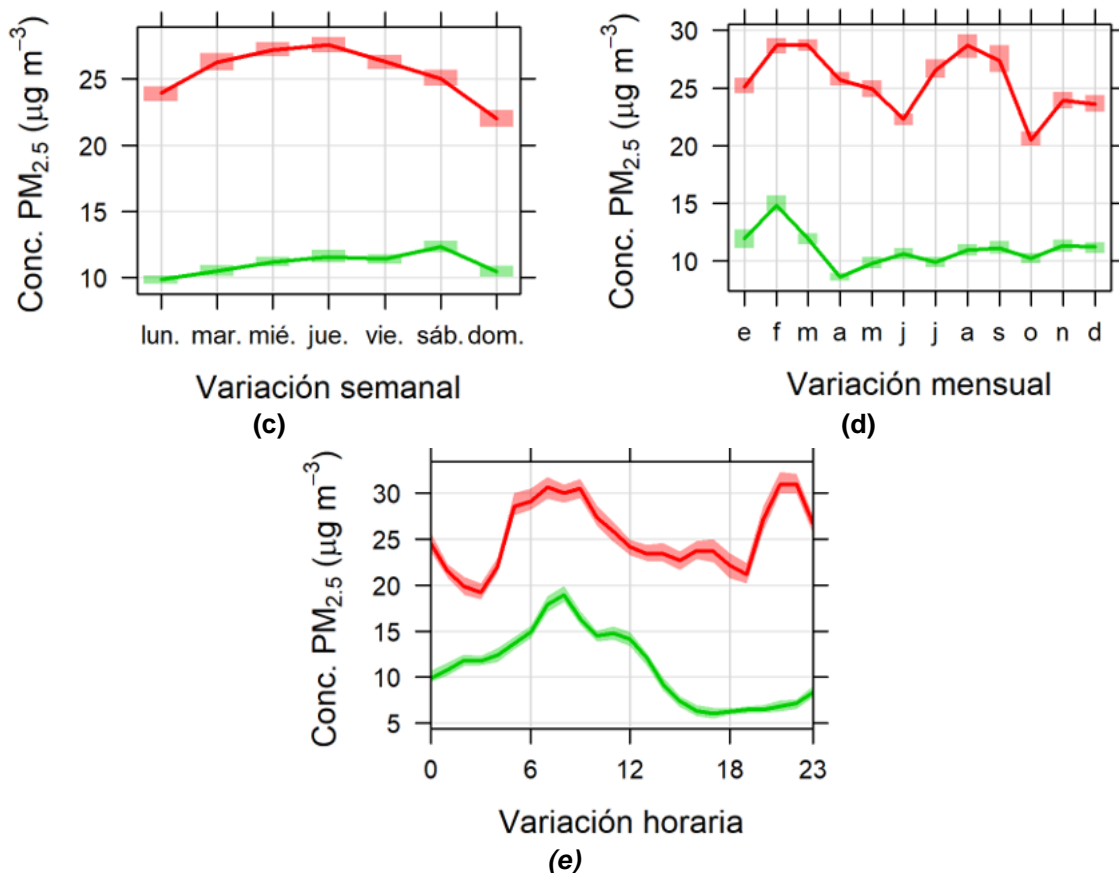


Figura 14. Comportamiento del $PM_{2.5}$ en las estaciones ubicadas en el municipio de Yumbo, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario
 Fuente: Elaboración propia.

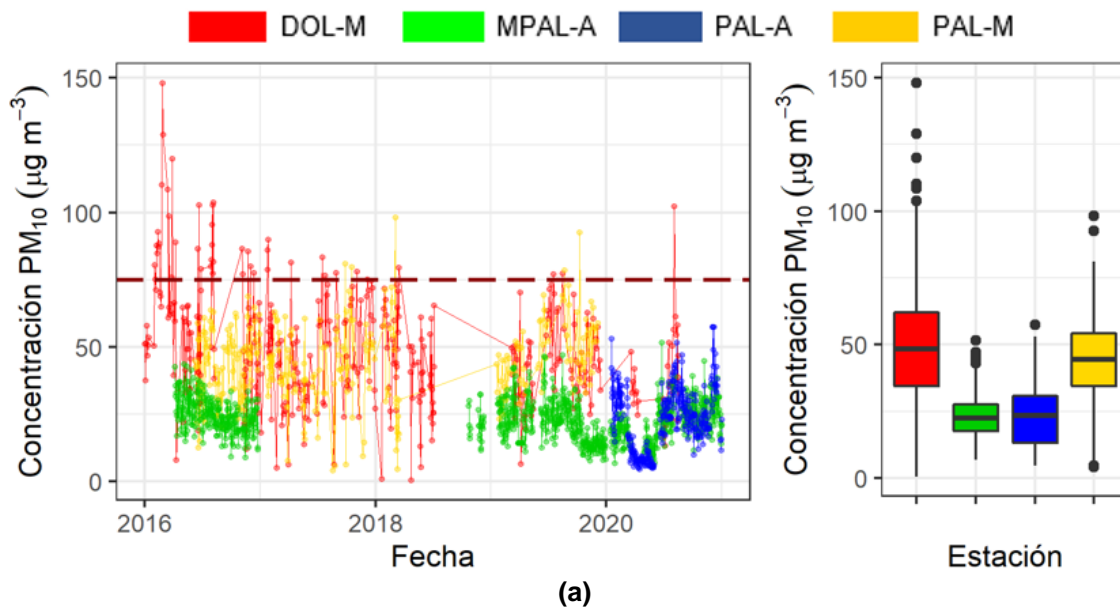
Es importante mencionar que la estación ACO-A presentó múltiples excedencias a la norma durante el periodo de análisis de los registros de concentración, siendo más frecuente en los últimos 3 años con concentraciones alrededor de los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Para las demás estaciones del municipio, el PM_{10} en la estación AME-M muestra que las concentraciones estuvieron alrededor de los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que en la estación de YUM se registraron valores alrededor de los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo mayores en YUM-M.

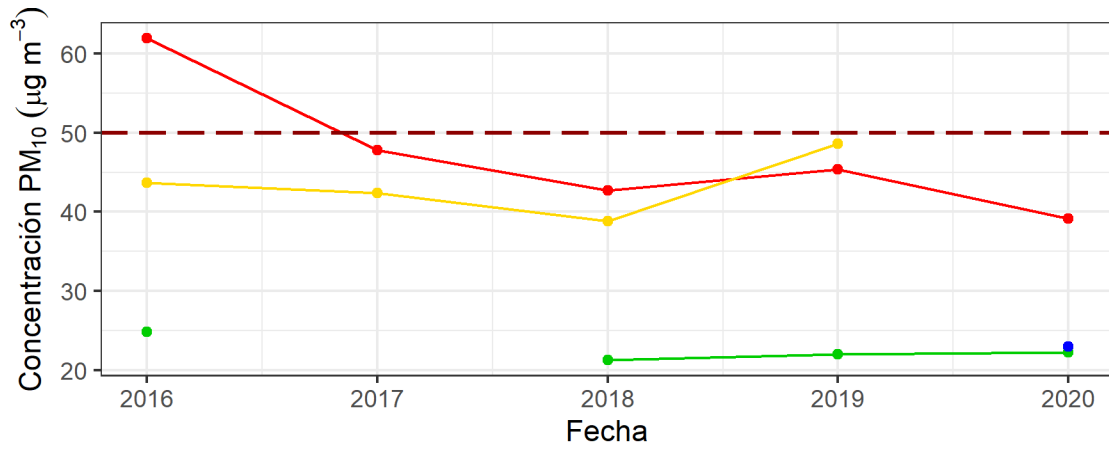
1.3.4. Comportamiento del material particulado en el municipio de Palmira

La Figura 15 muestra el comportamiento del PM_{10} en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira. En términos del comportamiento promedio anual, en la estación DOL-M, ubicada sobre el sector industrial de La Dolores, las concentraciones anuales han disminuido progresivamente. Para el 2016 estaban en $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, llegando a los $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 2020. En la estación MPAL-M, ubicada al interior de campus de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, se observa que las concentraciones permanecen entre los 20 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo analizado, mientras que en la estación PAL, ubicada sobre

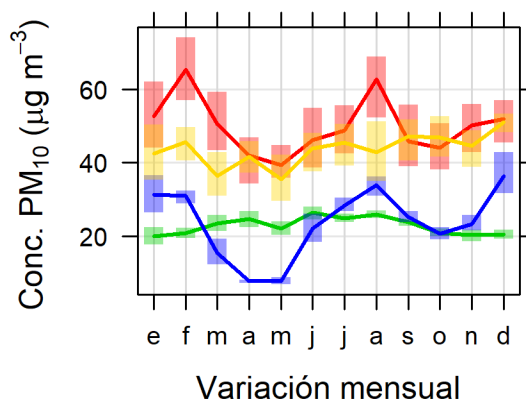
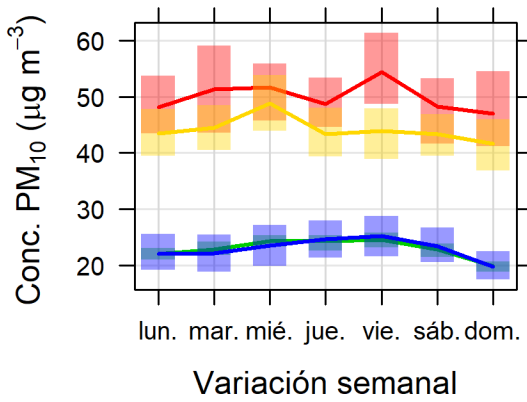
el centro urbano y comercial del municipio, las concentraciones se encuentran entre los 40 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, al cambiar a tecnología de monitoreo automático en 2020 y teniendo en cuenta la reducción de actividad debido a la pandemia del Covid-19, las concentraciones de dicha estación disminuyeron considerablemente llegando a los 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figura 16 muestra el comportamiento del contaminante $\text{PM}_{2.5}$ en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira. La estación PAL-A tan solo reporta concentraciones para el 2020, con registros promedio anuales alrededor de los 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras tanto, en las estaciones de DOL-M y PAL-M las concentraciones promedio están alrededor de los 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. En la estación PAL-M las concentraciones pasaron de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2017 a 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2019, mientras que en la estación DOL-M las concentraciones anuales han ido disminuyendo, pasando de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016 a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2020. Las elevadas concentraciones sobre el corregimiento de La Dolores (estación DOL-M), podrían ser explicadas por la presencia de vías sin pavimentar que junto con la actividad industrial contribuyen con las concentraciones del material particulado. Mientras tanto, en la estación PAL-M, si bien está ubicada en el centro urbano del municipio y expuesta a la actividad comercial, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ son cerca del 90% del PM_{10} , comportamiento que podría asociarse a una actividad con emisiones importantes de material particulado fino, por ejemplo, asociadas a tráfico vehicular, así como posibles precursores que favorezcan la formación de material particulado secundario en regiones cercanas a la estación.



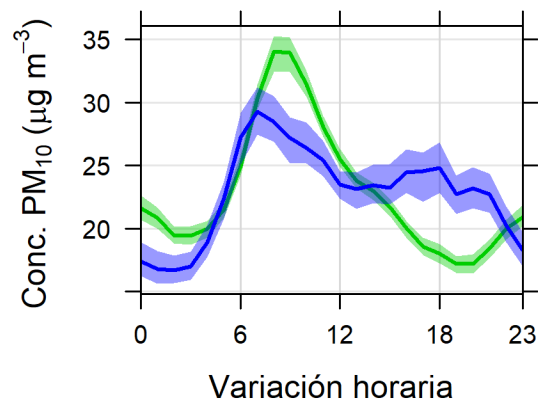


(b)



(c)

(d)



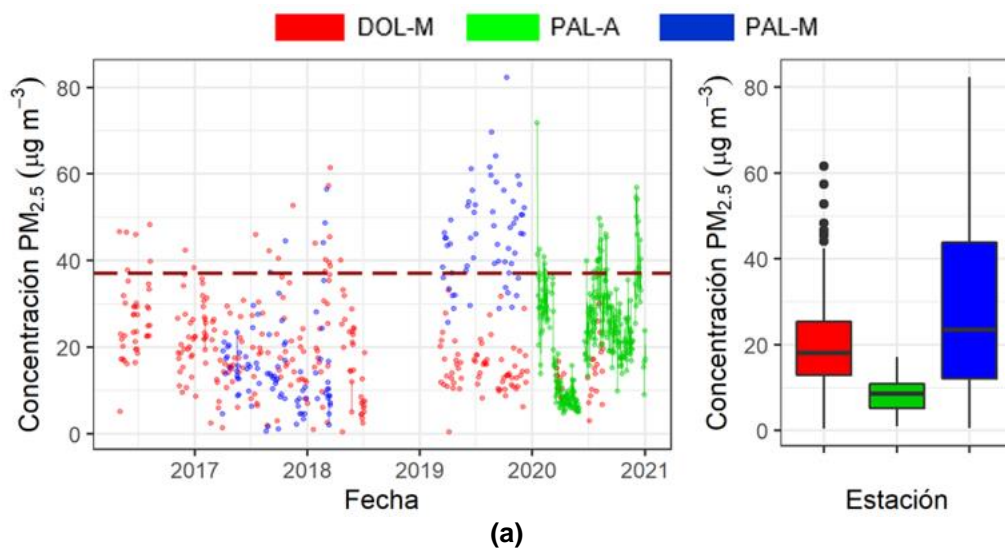
(e)

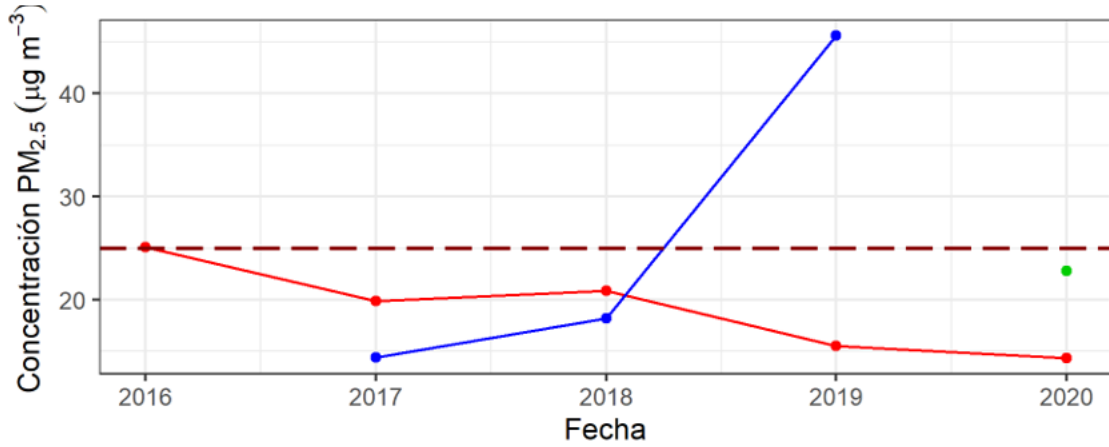
Figura 15. Comportamiento del PM₁₀ en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que lo evidenciado en el municipio de Yumbo, las concentraciones durante la semana están condicionadas por la actividad propia del municipio, donde generalmente los fines de semana se presenta una disminución (principalmente los domingos). Sin embargo, para Palmira hay algunas excepciones. Las concentraciones durante la semana muestran cómo días con mayores concentraciones al viernes y miércoles para la estación DOL-M con $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} y $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ respectivamente; mientras tanto para PAL-M las mayores concentraciones se presentan los lunes, domingos y miércoles con cerca de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y el miércoles con $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Sin embargo, se destaca que no hay un día que registre en promedio concentraciones muy altas en relación con los demás registros de la semana, sugiriendo un comportamiento relativamente constante en los perfiles diarios del municipio.

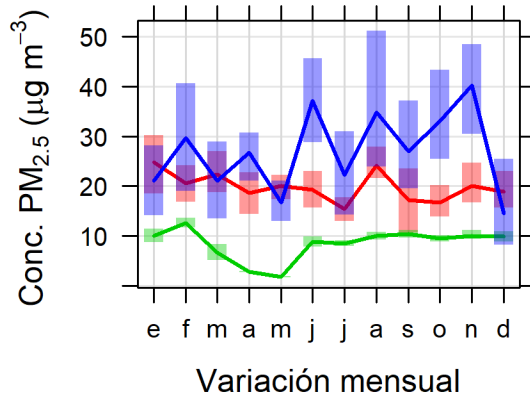
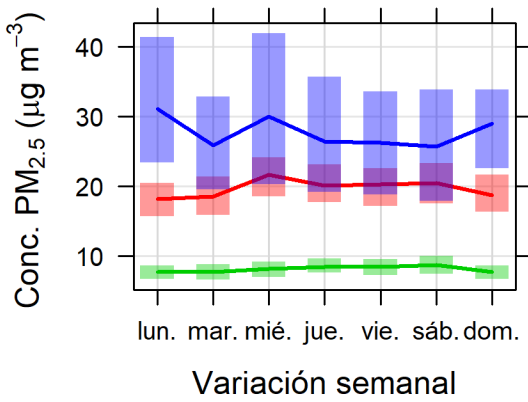
Durante el año las estaciones muestran dos periodos de altas concentraciones, donde las más bajas concentraciones están asociadas a los periodos de lluvias. La estación DOL-M muestra dos periodos de mayores concentraciones, el primero en febrero y el segundo en agosto con concentraciones que oscilan entre los 65 y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} ; y entre 5 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{PM}_{2.5}$.

En análisis de perfiles horarios muestra como en el transcurso del día en las estaciones PAL-A y MPAL-A se presenta un periodo de altas concentraciones de PM_{10} alrededor de las 10 horas, siendo más alto en MPAL-A y llegando a los $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, en PAL-A se presenta un segundo periodo entre las 14 y 20 horas con un leve descenso a las 19 horas, donde las concentraciones llegan hasta los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En lo que respecta al $\text{PM}_{2.5}$, tan solo la estación PAL-A presenta datos con una periodicidad horaria, llegando a máximos de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un segundo periodo con menor intensidad con $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 18 horas. Estas menores concentraciones reportadas en el segundo periodo del día pueden estar influenciados por la influencia de la marea del Pacífico que facilita la dispersión del material particulado asociado con una mayor ventilación en el VRC.



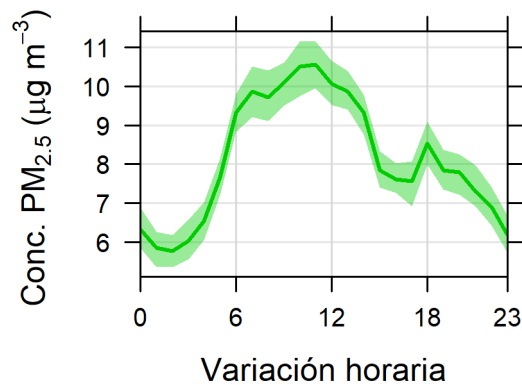


(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 16. Comportamiento del $PM_{2.5}$ en las estaciones ubicadas en el municipio de Palmira, la franja sombreada alrededor de los perfiles representa un IC del 95%. a) Serie temporal con promedios diarios y box plot. b) Promedio anual. c) Promedio semanal. d) Promedio mensual. e) Promedio horario

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se destaca que la estación DOL-M entre 2016 y 2017 presentó excedencias a la norma, con concentraciones alrededor de los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} . En la estación PAL-M en 2019 se reportó un incremento importante de $\text{PM}_{2.5}$ con concentraciones alrededor de los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que duplican los registros de años previos y superan la norma anual colombiana; este comportamiento según los funcionarios que operan las estaciones fue causado por fenómenos locales de emisión en inmediaciones de la estación asociados con procesos de desarrollo urbano.

1.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los vientos sobre el VRC se caracterizan por ser de poca intensidad provenientes generalmente del norte. Sin embargo, los vientos son un poco más intensos sobre el centro-sur del VRC, a la altura el municipio de Yumbo, con vientos provenientes del noroccidente predominantemente entre las 14 y 21 horas, influenciado por los vientos provenientes del Pacífico. Al sur del VRC los vientos se curvan hacia el oriente y el norte a medida que se encuentran con la cordillera de los Andes al norte del departamento del Cauca. En general, los vientos antes de las 10 horas se caracterizan por ser de tipo brisas débiles. A partir de esta hora comienzan a ser vientos más intensos influenciados por la entrada de corrientes de aire del Pacífico hasta alrededor de las 22 horas, donde vuelven a tener un comportamiento de brisas débiles. Por lo tanto, los procesos de dispersión de contaminantes atmosféricos se podrían ver favorecidos entre las 10 y 22 horas, en especial entre las 14 y 20 horas, mientras tanto el resto del día se favorece el estancamiento y podrían presentarse fenómenos de contaminación de tipo local.

Las organizaciones encargadas de la operación y mantenimiento de los SVCA deben asegurarse de que los datos recopilados para la caracterización de los procesos ambientales sean del tipo y calidad adecuados para su uso previsto y que las diferentes tecnologías operen de acuerdo con las expectativas definidas (EPA, 2002). Por lo tanto, se hace necesario realizar una mejora en los planes de aseguramiento y control de la calidad de los datos, con el fin de asegurar como mínimo el 75% de datos válidos establecido normativamente. Las recomendaciones operativas frente a un mejor desempeño del SVCA se encuentran en el documento “Estado de la red del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC)”. No obstante, procedimientos como el cambio de un sistema de monitoreo manual a uno automático en varias estaciones, el cambio de ubicación de estaciones con problemas de exposición local (por ejemplo, ACO) y el incremento de puntos de monitoreo (14 estaciones automáticas) evidencian que el SVCA de la CVC ha mejorado sustancialmente en los últimos años.

Los perfiles de los diferentes contaminantes atmosféricos se ven condicionados por las diferentes variables meteorológicas y la actividad propia de los municipios. En general, los periodos con mayores precipitaciones durante el año (meses de abril-mayo y octubre-noviembre) son característicos de menores concentraciones de material particulado, debido a que las lluvias facilitan la remoción de este contaminante en la atmósfera. Durante el día, las mayores intensidades del viento se reportan en horas de la tarde, favoreciendo la dispersión del material particulado. Otro factor que determina las concentraciones del

material particulado es la actividad de los municipios, donde generalmente los fines de semana la actividad laboral se reduce haciendo que las emisiones sean menores (principalmente los domingos) en comparación con los demás días entre semana.

Según el análisis por regiones, se observaron diferencias en las concentraciones de material particulado, siendo el municipio de Yumbo la región con las mayores concentraciones, principalmente en el sector de Acopi, donde durante el día las concentraciones de PM_{10} oscilan alrededor de los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en $PM_{2.5}$ oscilan alrededor de los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento está asociado con la actividad industrial principalmente y el estado de las vías del sector que condicionan fenómenos de contaminación locales.

Las concentraciones reportadas para el material particulado y demás contaminantes atmosféricos en el año 2020 estuvieron condicionadas a los efectos de las cuarentenas y restricciones de movilidad por la pandemia del Covid-19. La actividad general de los municipios se vio reducida sustancialmente, registrando un descenso en las concentraciones. Además, en algunas estaciones de monitoreo el seguimiento y mantenimiento no se pudo realizar de manera adecuada ocasionando que se presentaran comportamientos atípicos con mayor frecuencia como la deriva, concentraciones inusualmente repetidas o periodos sin captura de datos.

CAPÍTULO 2. EMISIONES ESTIMADAS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA PARA LA SIMULACIÓN

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es ocasionada por la liberación a la atmósfera de sustancias nocivas (gases o partículas), tanto de origen natural como antropogénico, que pueden causar efectos adversos sobre la salud de las personas y el ambiente (WHO, 2021). Los contaminantes una vez liberados a la atmósfera, son susceptibles de sufrir transformaciones químicas, transportarse o depositarse sobre el suelo o diferentes superficies. En particular, esta capacidad de ser transportados hace que los episodios de contaminación en una región puedan ser originados o exacerbados por emisiones que ocurrieron en otro lugar, siempre que las condiciones meteorológicas favorezcan el transporte de los contaminantes hasta el área evaluada.

En el marco del presente convenio se evaluaron no solo las emisiones de contaminantes atmosféricos originados específicamente en los municipios de Yumbo y Palmira, sino también la influencia de emisiones de municipios cercanos que, por las dinámicas de circulación atmosférica y transporte de contaminantes en el VRC, puedan tener una posible influencia en la calidad del aire de los municipios de interés.

En este sentido, fue necesario inicialmente definir un área de influencia con propósitos de simulación de calidad del aire en la cual se realizó la estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos. Para definir el área de influencia se llevaron a cabo una serie de simulaciones de calidad del aire basadas en la inyección de emisiones hipotéticas, denominadas simulación de trazadores. Estas simulaciones permitieron analizar el efecto de emisiones hipotéticas que se inyectaron sobre diferentes puntos del VRC definidos según la configuración geográfica del Valle y la estructura misma del dominio de simulación de interés, que cubre algunos municipios de los departamentos del Cauca y Valle del Cauca.

El ejercicio de simulación con trazadores tuvo como objetivo entonces evaluar y comprender de forma general el transporte de los trazadores inyectados y el posible impacto de las concentraciones asociadas a dichas emisiones sobre los municipios de Yumbo y Palmira. Con este ejercicio se delimitó una región alrededor de los municipios de interés, lo cual permitió enfocar esfuerzos en la determinación de las emisiones atmosféricas en la región de estudio. Este insumo fue fundamental para las posteriores simulaciones de calidad del aire, ya que este fue el punto de partida para realizar un estudio realista y detallado de las condiciones que afectan el estado de la calidad del aire no solo asociado con las emisiones de contaminantes atmosféricos en Palmira y Yumbo, sino también con el efecto del transporte regional de contaminantes atmosféricos emitidos en el VRC, para finalmente proponer un estudio lo más realista posible de la contribución de las fuentes de emisión predominantes en la región de estudio.

Una vez definida el área de influencia, se desarrollaron una serie de inventarios de emisión de tipo antropogénico con énfasis en fuentes móviles y fuentes estacionarias (fijas o puntuales y de área o difusas), los cuales se ingresaron al modelo simulación de calidad del aire WRF-Chem. La definición de las fuentes de emisión que fueron tenidas en cuenta en los ejercicios de estimación de emisiones atmosféricas se basó en un análisis riguroso de las dinámicas socioeconómicas en la región de estudio. El resumen de las fuentes de emisión seleccionadas para la estimación de los inventarios de emisión en el área de influencia para la simulación se resume en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de fuentes tenidas en cuenta en la estimación de los Inventarios de emisiones atmosféricas desarrollados para los municipios del área de influencia para la simulación de calidad del aire

Fuente	Inventario
Fuentes móviles	En ruta – emisiones por exhosto (combustión vehicular)
	Resuspensión en vías pavimentadas y no pavimentadas
Fuentes estacionarias	Sector industrial
	Panaderías
	Asaderos
	Estaciones de servicio (EDS)
	Ladrilleras
	Almacenamiento de combustible
	Producción artesanal de carbón vegetal
Fuentes difusas	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón (AABA)
	Canteras
	Maquinaria agrícola (Combustión en maquinaria agrícola en la cañicultura)
	Resuspensión por actividades agrícolas
	Gas natural residencial
	Fertilización agrícola (Uso de fertilizantes en la cañicultura)
	Quemas abiertas en precosecha e incendios
	Pecuaria precursores de aerosoles secundarios inorgánicos (SIA, por sus siglas en ingles)
Rellenos sanitarios	

Fuente: Elaboración propia

Posterior a la estimación de emisiones atmosféricas, se realizaron procedimientos de desagregación espacial y temporal de emisiones. Este ejercicio consistió en localizar las fuentes de emisión y sus respectivas emisiones para aplicar procedimientos de distribución espacial y temporal dentro del área de estudio, estableciendo por ejemplo la variación de los flujos de emisión en un periodo de tiempo dado (Gómez, 2017), así como la variación espacial de emisiones en función de una resolución de 1 km x 1 km, consistente con la distribución de celdas definida para la simulación de calidad del aire. De manera general, para llevar a cabo el proceso de desagregación se define la resolución espacial, término asociado al tamaño de subunidades dentro del área de estudio (celdas dentro de una cuadrícula uniforme). Asimismo, se define una resolución temporal de emisiones horarias en un día típico de la semana principalmente. Por lo tanto, las emisiones totales anuales estimadas en el área de influencia para la simulación se distribuyen en cada una de las unidades espaciales y temporales definidas utilizando alguna aproximación estadística, en

la cual se utiliza información que relaciona de manera directa o indirecta las dinámicas de emisión de contaminantes (Gómez, 2017).

La desagregación de los inventarios de emisión permite identificar las zonas y las horas en donde se da una mayor liberación de emisiones a la atmósfera, brindando información valiosa para la gestión de la calidad del aire. Adicionalmente, los inventarios desagregados son un insumo indispensable para poder realizar simulaciones de calidad del aire utilizando modelos eulerianos de transporte químico, ya que estos modelos requieren la información detallada de emisiones con una distribución espaciotemporal definida. Al considerar fenómenos de mezcla, transporte, deposición y transformaciones químicas en la atmósfera, este tipo de modelos ofrecen información sobre la concentración en aire ambiente atribuible a dichas emisiones, permitiendo estudiar los niveles de contaminación a los que puede estar expuesta la población de una región específica.

2.1. DEFINICIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA CON PROPÓSITOS DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Con el propósito de definir el área de influencia para llevar a cabo la estimación de las emisiones para los municipios de Yumbo y Palmira y las emisiones regionales, se llevaron a cabo los siguientes ejercicios de simulación preliminar con inyección de trazadores hipotéticos: 1) Ejercicio de simulación con trazadores de emisión continua. 2) Ejercicio de simulación con emisión por pulsos horarios de trazadores, este ejercicio buscó complementar el análisis del área de influencia y generar insumos para comprender los mecanismos de circulación regional en el VRC.

2.1.1. Simulación con emisión de trazadores continuos para establecer el área de influencia con propósitos de simulación

Para definir el área de influencia con propósitos de simulación de calidad del aire, se realizaron un total de 6 simulaciones con emisión de trazadores empleando el modelo euleriano de transporte químico WRF-Chem. En cada una de estas simulaciones se asumió un valor hipotético de emisión constante de las especies CO y PM_{2.5}, las cuales por sus propiedades fisicoquímicas y en ausencia de otras especies químicas en la simulación, permiten evaluar de forma preliminar las dinámicas de transporte en el área de estudio sin tener en cuenta aspectos adicionales propios de la química atmosférica, como transformación o generación de contaminantes secundarios. Se ubicó entonces dentro de la región de simulación puntos de emisión sobre algunos municipios cercanos al área de interés, seleccionados según el comportamiento meteorológico identificado previamente en el análisis de variables en superficie y la simulación meteorológica. Los resultados del modelo fueron empleados para establecer si los contaminantes inyectados pueden ser transportados desde el punto en el que son emitidos hasta el área de interés.

2.1.1.1. Puntos de inyección de trazadores y valores asignados

La Figura 17 presenta los puntos sobre los cuales se realizó la inyección de una emisión continua de trazadores. La ubicación de los puntos se diseñó teniendo en cuenta municipios en regiones de importancia en los extremos norte, occidente y sur de los municipios de Yumbo y Palmira. Los puntos de inyección de cada emisión fueron ubicados sobre los municipios de Cartago, Tuluá, Buenaventura, Cali (zona norte y sur) y Santander de Quilichao. Es importante destacar, que no se incluyeron puntos de inyección de trazadores al oriente debido a que allí se encuentra ubicada la cordillera Central, la cual provee una barrera topográfica que limita el transporte regional de contaminantes que puedan ser emitidos en regiones ubicadas hacia el oriente de la cordillera Central.

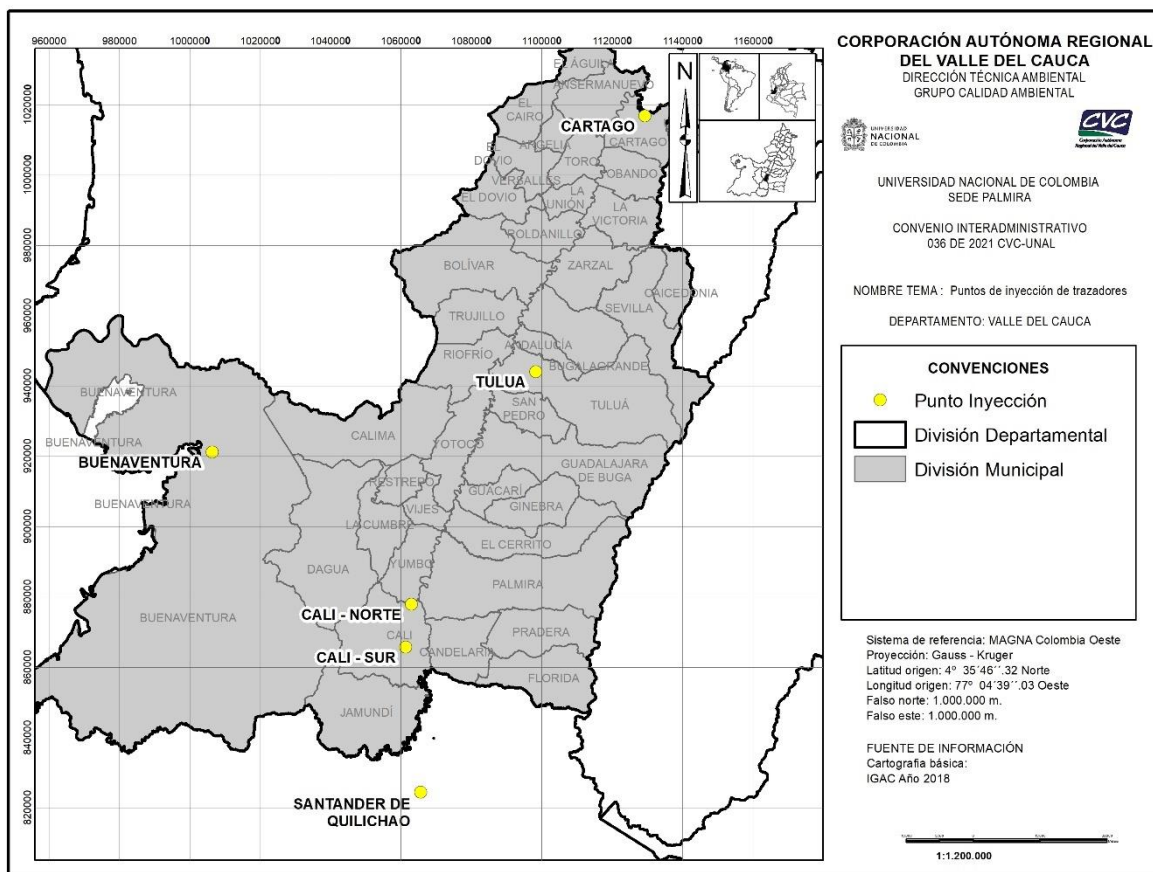


Figura 17. Ubicación de los puntos de inyección de trazadores con emisión continua
Fuente: Elaboración propia.

Sobre estos puntos se realizó una inyección de una emisión de $2000 \text{ mol km}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de CO_2 y de $0.82 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de $\text{PM}_{2.5}$. Estos valores de emisión se escogieron como un factor de referencia, que equivale a 13000 ton/año de CO_2 y 650 ton/año de $\text{PM}_{2.5}$, a partir de los valores de emisión reportados para el municipio de Palmira según el inventario global de emisiones EDGAR- HTAP (disponible en <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>).

Para poder incluir estas emisiones al modelo WRF-Chem fue necesario generar archivos en formato NetCDF para cada uno de los escenarios propuestos. Este proceso se desarrolló utilizando el lenguaje de programación Python y el preprocesador de emisiones PyChEmiss (disponible en: <https://github.com/quishqa/PyChEmiss>).

Es importante destacar además que el uso de las especies CO y PM_{2.5} como trazadores, tiene en cuenta su propiedad de tener un tiempo de vida atmosférico medio, permitiendo así que permanezcan en la atmósfera o sean transportados por periodos de algunos días o semanas.

2.1.1.2. Configuración del modelo de calidad del aire para la simulación de trazadores

Se utilizó el modelo WRF-Chem V.4.2.2 para realizar las simulaciones de trazadores, empleando como periodo de simulación tres días comprendidos entre el 1 al 3 de julio de 2018. Debido a la cobertura espacial tan amplia que presentan los puntos de inyección seleccionados, la inyección de emisiones y la simulación se llevó a cabo sobre el dominio 2 de simulación, el cual posee una resolución de 5 km x 5 km y presenta un cubrimiento total del departamento del Valle del Cauca y sus alrededores. En el capítulo 3 se describen en detalle los aspectos de configuración espacial de los dominios establecidos para la simulación de calidad del aire

Las parametrizaciones físicas y químicas para correr el modelo fueron definidas en el ejercicio de simulación realizado durante la vigencia 2021 del presente convenio. Es de aclarar que para estas simulaciones no se consideró la inclusión de condiciones iniciales y de contorno químicas, ni tampoco emisiones biogénicas o antropogénicas diferentes a las del trazador inyectado. Esto con el fin de garantizar que las concentraciones simuladas sean influenciadas únicamente por la emisión hipotética inyectada, y no por formación secundaria o asociadas a concentraciones de fondo en la región de simulación.

2.1.1.3. Post-procesamiento de resultados

Implementando comandos NCO para procesamiento de datos, y el software Python para generar salidas gráficas, se elaboraron mapas de concentración máxima de CO y PM_{2.5} sobre el área de simulación. Dichos mapas permitieron observar el recorrido seguido por los trazadores durante la simulación, y determinar regiones donde se obtienen valores máximos de concentración, permitiendo así generar herramientas de análisis para determinar si el posible impacto sobre la calidad del aire en los municipios de interés puede ser o no significativo.

Adicionalmente, se extrajeron las series temporales de concentración de las especies analizadas (CO y PM_{2.5}) sobre los centros urbanos de Palmira y Yumbo, permitiendo evaluar el incremento relativo en los niveles de concentración evidenciados en estos municipios a causa del transporte de contaminantes desde los diferentes puntos de inyección de trazadores. Se aclara que, al ser un ejercicio de inyección hipotética de emisiones, lo que se buscó fue analizar los resultados comparativamente entre los puntos de emisión seleccionados y su efecto relativo con base en los picos de concentración generados.

2.1.1.4. Resultados obtenidos en la definición del área de influencia con propósitos de simulación

A partir de las simulaciones con inyección continua de trazadores, se generaron una serie de animaciones que ilustran la trayectoria de la pluma de dispersión sobre el área de simulación, estas animaciones están a disposición en el Anexo 3 del presente informe. Los resultados de las distintas plumas de dispersión sugieren que el mayor impacto sobre Palmira y Yumbo es generado por las emisiones provenientes del trazador ubicado en el municipio de Tuluá principalmente, tal como se muestra en la Figura 18.

A pesar de que los trazadores inyectados sobre Tuluá se dispersan mayoritariamente hacia el norte del valle del Cauca, se puede apreciar que una parte de estos se transporta hacia el sur, llegando a impactar la calidad del aire de Palmira. De otra parte, los contaminantes inyectados sobre Cartago sufren un comportamiento similar, siendo transportados en su mayoría hacia al norte del valle y una fracción menor transportada hacia el sur; sin embargo, contrario a lo que pasa con Tuluá, los contaminantes transportados hacia el sur no ingresan en Palmira o Yumbo, debido a una mayor distancia con respecto a los municipios de interés. Este resultado es relevante, ya que permite establecer un límite del área de influencia en el municipio de Tuluá.

Con respecto a las emisiones inyectadas en Buenaventura, el transporte de los trazadores se concentra mayoritariamente sobre la vertiente occidental de la cordillera Occidental. Sin embargo, debido a la depresión en la topografía entre el cerro Calima y el pico Farallones, se da paso a una estela de concentración de trazadores que podría influenciar la calidad del aire de Yumbo y la zona occidental de Palmira. Este ingreso de contaminantes podría verse intensificado durante los periodos de la marea del Pacífico, en donde los vientos provienen del Pacífico en dirección occidente a oriente.

Finalmente, analizando el escenario de inyección de emisiones sobre el municipio de Santander de Quilichao, se aprecia una influencia muy pequeña de estas emisiones sobre la calidad del aire de Yumbo y Palmira en el periodo de simulación, dado que los contaminantes se transportan predominantemente hacia el sur con relación al lugar donde fueron inyectados. En lo que respecta al Valle del Cauca, el impacto más marcado de estas emisiones se presenta sobre Jamundí, Cali y Candelaria.

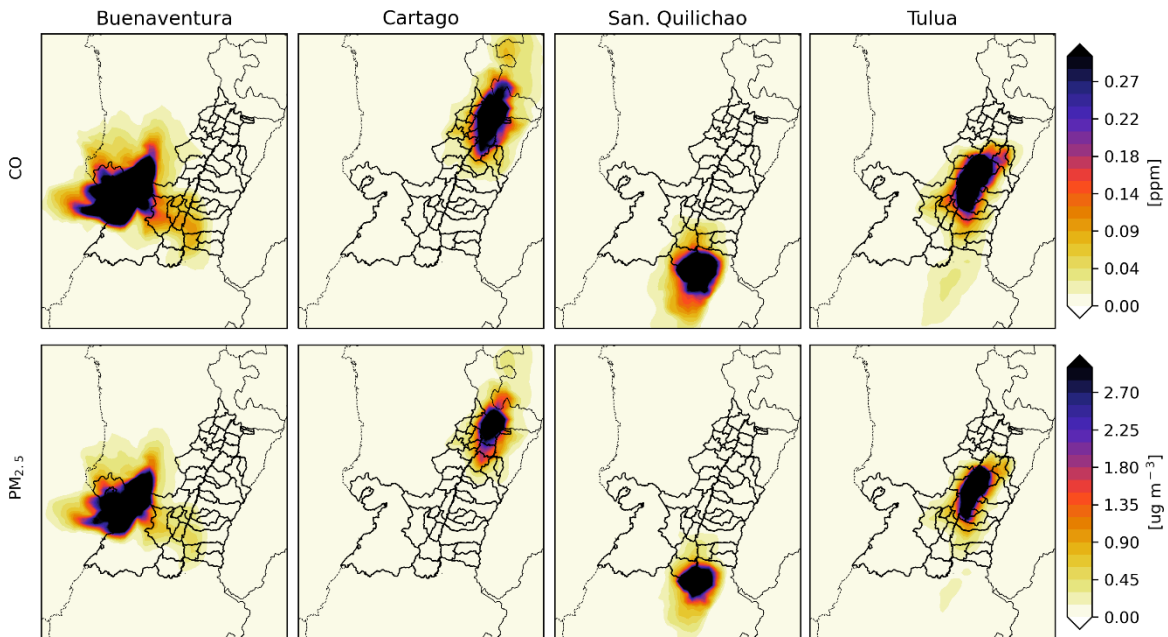


Figura 18. Mapas de concentración máxima de trazadores para las inyecciones de emisión continua realizadas en Buenaventura, Cartago, Santander de Quilichao y Tuluá
Fuente: Elaboración propia.

Como complemento al análisis anterior, se presenta en la Figura 19 la serie temporal de concentración de trazadores sobre el centro urbano de Palmira y Yumbo, producto del transporte de los contaminantes inyectados. Se aprecia que la mayor influencia sobre Palmira es generada por las emisiones provenientes de Tuluá, alcanzando un valor máximo de concentración de 0.06 ppm de CO y 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. Para el caso de Yumbo, las emisiones más influyentes provienen desde Buenaventura, generando picos de concentración sobre Yumbo que alcanzaron 0.10 ppm de CO y 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. Es de importancia resaltar que estos valores de concentración son meramente indicativos, y solo deben ser usados para analizar la influencia relativa que tiene una fuente de emisión, ya que este ejercicio parte de valores hipotéticos de inyección de trazadores que pueden no representar un valor de inyección ajustado a la realidad.

De otro lado, la serie temporal muestra un impacto nulo de las emisiones provenientes de Cartago sobre Yumbo y Palmira, reforzando nuevamente la idea de que no es necesario considerar municipios tan distantes hacia al norte del área de interés más allá de los límites con Tuluá. Por último, se observan picos de concentración tanto en Yumbo y Palmira generados por las emisiones de Santander de Quilichao, pero son relativamente pequeños en magnitud, al comparar con las concentraciones asociadas a las emisiones de Buenaventura y Tuluá discutidas previamente.

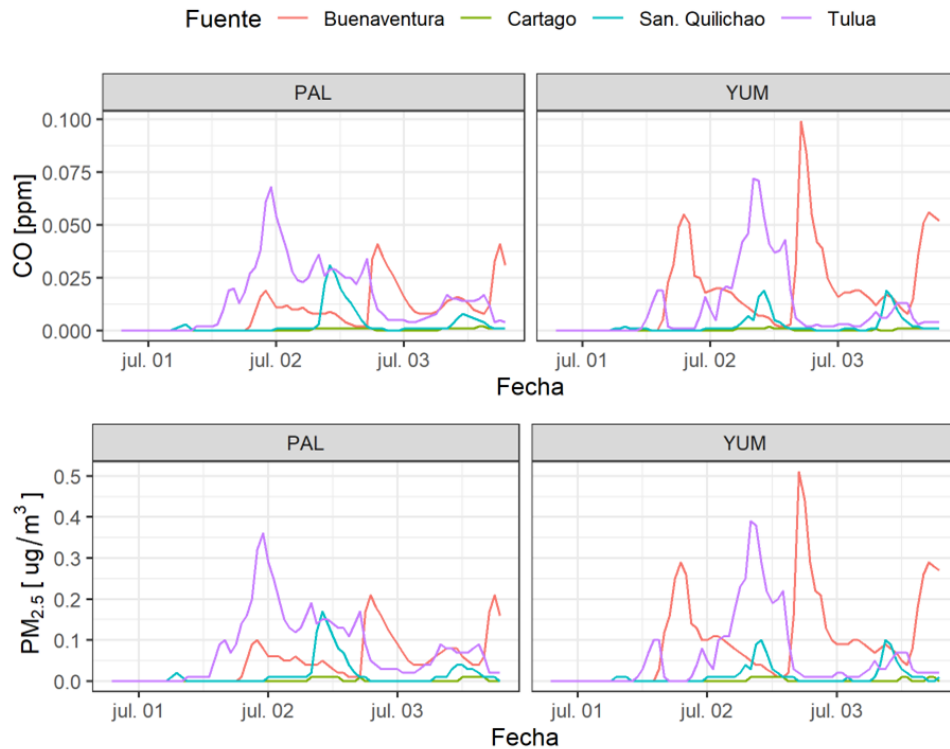


Figura 19. Serie temporal de concentraciones del trazador detectado sobre Palmira y Yumbo
Fuente: Elaboración propia.

De manera similar a lo explicado previamente, se analizó el impacto del transporte de trazadores hacia Palmira y Yumbo cuando la inyección se realiza sobre la zona norte y sur de Cali. Este ejercicio es de importancia debido a la proximidad geográfica de Cali con los municipios de interés. Es de esperarse que las emisiones de Cali sean de importancia, pudiendo tener una influencia sobre la calidad del aire de Yumbo y Palmira. De hecho, los mapas de concentración obtenidos (ver Figura 20) muestran que los contaminantes inyectados tanto en el sur como en el norte de Cali podrían ser transportados hacia Yumbo principalmente.

Adicionalmente, es de destacar que se optó por realizar inyecciones en dos puntos de la ciudad de Cali, con el fin de conocer si la dispersión de contaminantes varía de manera significativa. En caso de presentarse diferencias considerables, esto demostraría la relevancia de realizar una distribución espacial con el mayor detalle posible de las emisiones sobre Cali para poder tener un resultado realista del impacto que generan las emisiones en Cali sobre Yumbo y Palmira.

Los resultados obtenidos de este ejercicio muestran de hecho que el impacto del transporte de contaminantes sobre Yumbo cambia drásticamente si la inyección de trazadores se realiza sobre el norte o sur de Cali, y como era de esperarse, el impacto es mayor cuanto las emisiones se dan en el norte de Cali. Este hecho también se corrobora al analizar las series temporales (Figura 21), en donde se observa que los picos máximos de

concentración reportados sobre Yumbo son dos veces más elevados cuando las emisiones se originan en el norte de Cali.

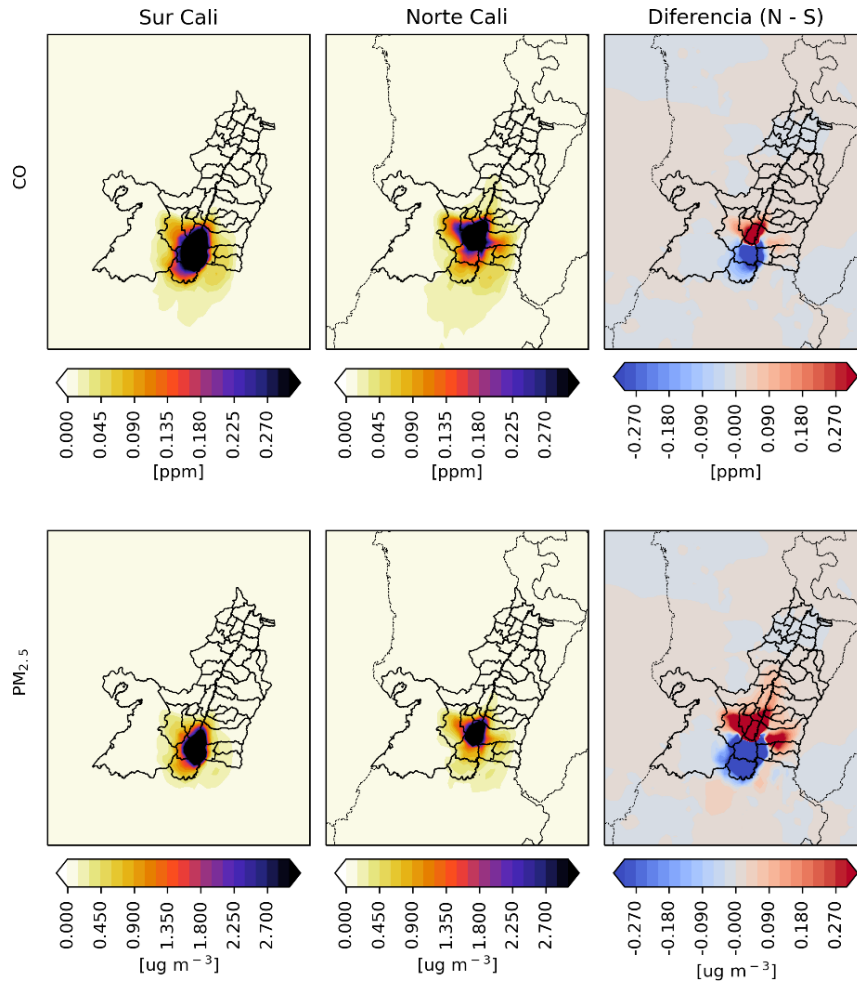


Figura 20. Mapas de concentración máxima de trazadores para las inyecciones de emisión continua realizadas en el norte y sur de Cali

Fuente: Elaboración propia.

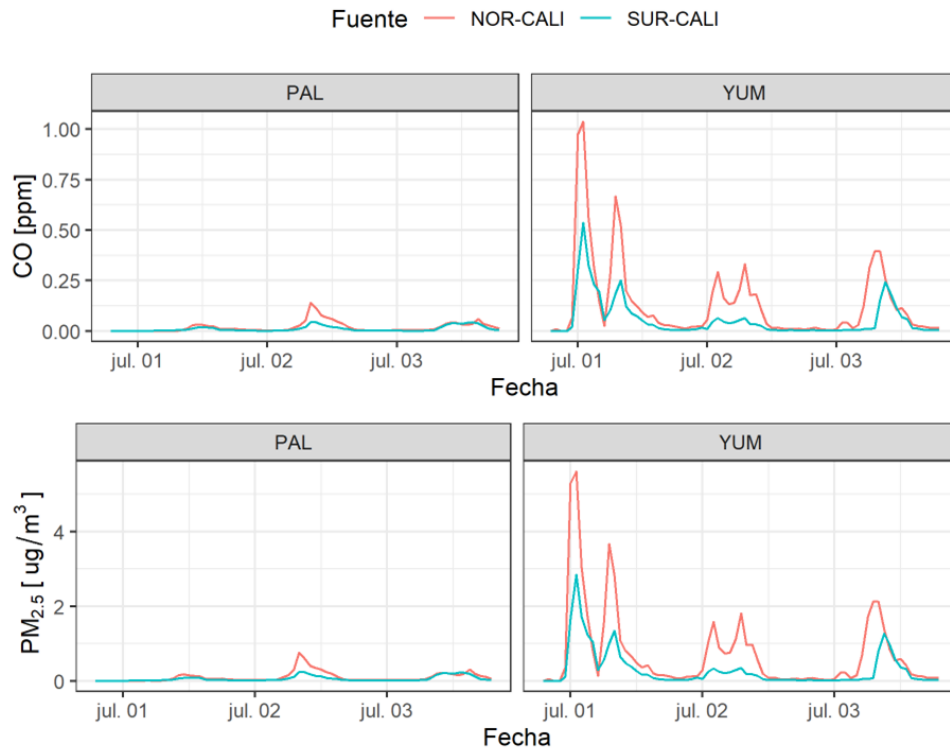


Figura 21. Serie temporal de concentraciones de trazador detectado sobre Palmira y Yumbo, producto de las inyecciones sobre el norte y sur de Cali
 Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de este ejercicio se definió un área de influencia con propósitos de simulación que comprende todos los municipios que se encuentran entre las cordilleras Occidental y Central; y que están limitados hacia el norte por Tuluá y al sur por Santander de Quilichao. Los municipios que hacen parte del área de influencia definida se muestran en la Figura 22.

Es importante aclarar que Buenaventura no fue incluido en el área de influencia, a pesar de mostrar un impacto sobre Palmira y Yumbo según el estudio de trazadores; dicha decisión se basó en dos factores: En primer lugar, la complejidad que tendría recopilar la información de emisiones de este municipio. Estas emisiones podrían ingresarse al modelo a partir de los inventarios globales (EDGAR-HTAP, por ejemplo) que se incluyen en el dominio de simulación previo y que ingresan por los bordes del dominio de interés. En segundo lugar, si bien Buenaventura podría ejercer influencia, esta es muy baja comparada con otros municipios del área de influencia. A modo de ejemplo, el máximo de concentración de CO registrado en Yumbo asociado a emisiones provenientes de Cali es de 1.03 ppm, mientras que es tan solo de 0.10 ppm cuando las emisiones provienen de Buenaventura, con lo cual comparativamente el aporte de Buenaventura es un orden de magnitud menor.

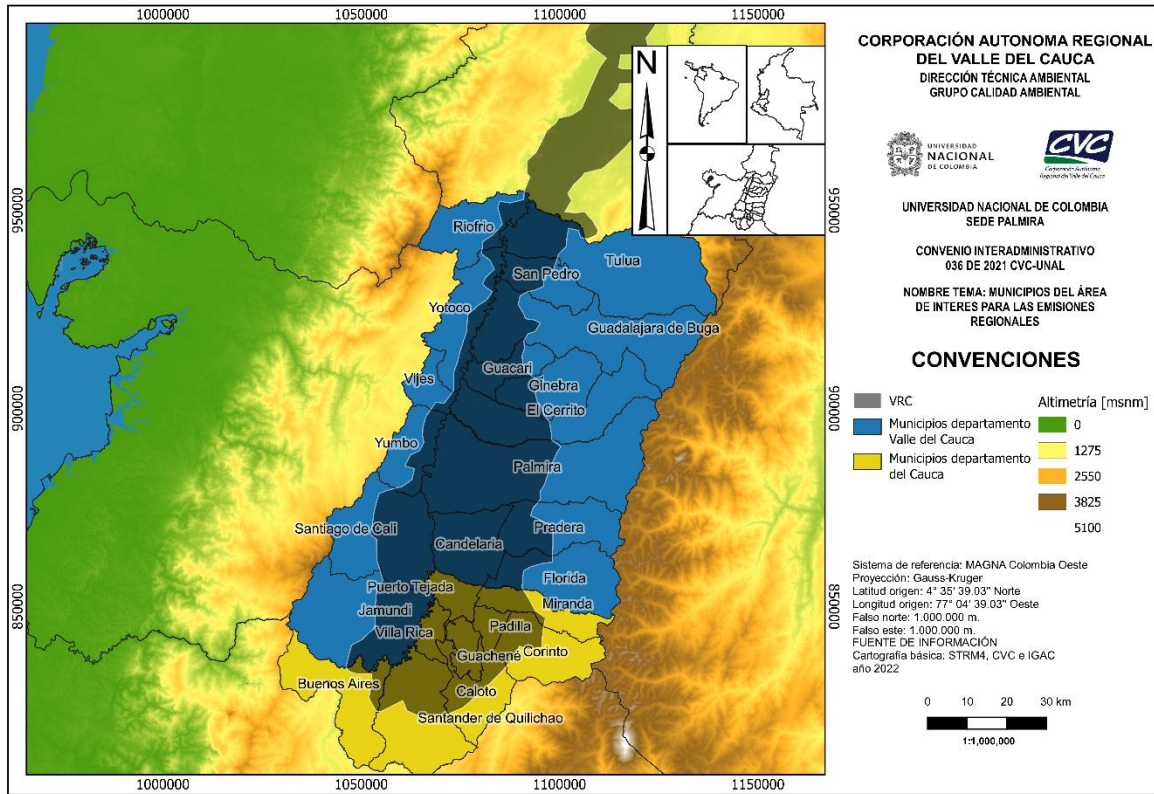


Figura 22. Municipios que componen el área de influencia con propósitos de simulación de calidad del aire sobre Yumbo y Palmira
Fuente: Elaboración propia.

2.1.2. Simulación con trazadores por pulsos para el estudio de la circulación atmosférica en el área de influencia

De manera complementaria a los ejercicios con trazadores de emisión continua, se realizaron simulaciones empleando emisiones por pulsos, lo cual quiere decir que la emisión está activa tan solo por una hora y se evalúa como con el paso del tiempo los contaminantes provenientes de este único episodio de emisión son transportados en el área de influencia. Analizar la trayectoria que siguen los contaminantes es de vital importancia para entender los patrones de circulación atmosférica en el área de estudio, y poder diferenciar el potencial efecto que podrían tener las emisiones desde y hacia la región de interés (Yumbo y Palmira).

Se seleccionaron 10 puntos (Figura 23), 7 de los cuales están al interior del dominio de simulación (d03) – dominio objetivo de alta resolución con 1 km entre puntos de grilla. Los puntos restantes están en el dominio intermedio de 5 km de resolución. Estos puntos fueron seleccionados para analizar diferentes fenómenos atmosféricos, que pueden influenciar la circulación en el área de estudio y, por lo tanto, el transporte de contaminantes.

La inyección de trazadores se realizó durante una hora y se evaluó la trayectoria que siguen estos contaminantes en función del tiempo transcurrido de simulación. Ahora bien, para

considerar diferentes regímenes atmosféricos durante el día, se realizaron inyecciones durante dos periodos, una inyección en la mañana a las 8 horas para estudiar un periodo sin la influencia directa de la marea del Pacífico, y otra inyección a las 16 horas para considerar el efecto del periodo de la marea del Pacífico.

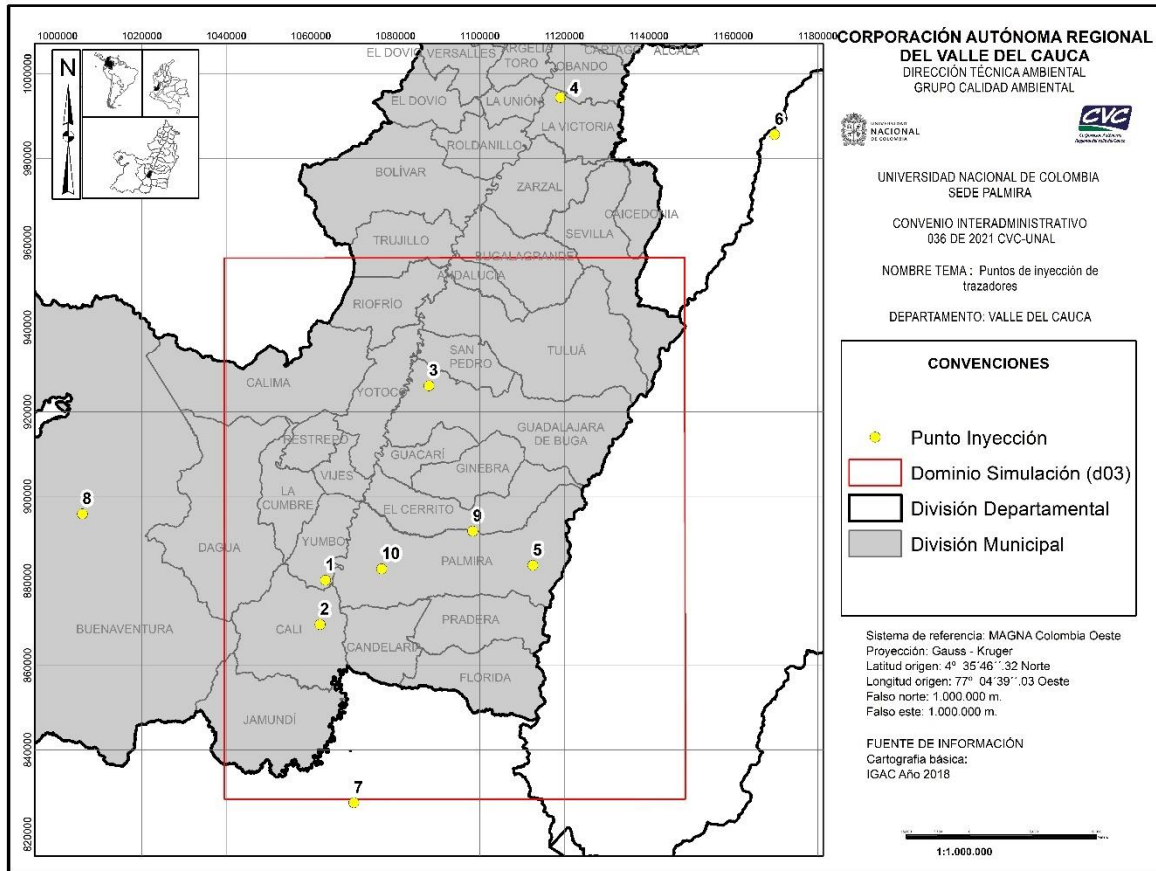


Figura 23. Ubicación de los puntos de inyección de trazadores por pulsos
Fuente: Elaboración propia.

Debido al elevado costo computacional de realizar inyecciones de trazadores en 10 puntos y para dos horas del día diferentes, se optó por inyectar en la mitad de los puntos a evaluar emisiones horarias de CO ($2000 \text{ mol km}^{-2} \text{ h}^{-1}$) y en la otra mitad restante emisiones horarias de PM_{2.5} ($0.82 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Esto permite simular el transporte de dos puntos de forma independiente empleando una única simulación, reduciendo en un 50% el tiempo computacional. Esta es una alternativa viable, pues de acuerdo con la configuración de las simulaciones ambos contaminantes inyectados no reaccionan ni interactúan entre sí.

Asimismo, con el propósito de que los resultados sean comparables sin importar el trazador inyectado (CO o PM_{2.5}), las concentraciones reportadas por el modelo fueron normalizadas según el valor máximo de concentración reportado para cada contaminante.

Las configuraciones de WRF-Chem para la simulación con trazadores por pulsos fueron idénticas al ejercicio de emisión continua descrito previamente. Tan solo se diferencian el

tamaño y resolución del dominio empleado para la simulación, ya que la mayoría de los pulsos de emisión fueron inyectados en el dominio objetivo (d03) que posee una resolución de 1 km x 1 km, mientras que los puntos ubicados en el dominio intermedio tienen una resolución de 5 km x 5 km.

A partir de la simulación de emisiones hipotéticas por pulsos en las horas de mayor y menor influencia de la marea del Pacífico, se pueden observar ciertos patrones de circulación atmosférica en la región que son un soporte importante para lo que será el análisis de resultados de las simulaciones de calidad del aire. La Figura 24a muestra la dispersión de los contaminantes inyectados en cada uno de los puntos una hora después de la emisión (9 y 17 hora local), mientras tanto, la Figura 24b muestra la dispersión 8 horas después de la emisión (16 y 0 hora local). Adicional a estas figuras que muestran dos horas puntuales de simulación, se adjunta en el Anexo 3 de este documento una animación que permite visualizar las 8 horas de dispersión analizadas.

Los resultados de este ejercicio sugieren los siguientes comportamientos asociados a cada punto de inyección: En el punto 1, ubicado sobre el municipio de Yumbo, las emisiones son desplazadas hacia el sur del VRC, durante la mañana estas llegan sobre la ciudad de Cali caracterizadas por una dispersión lenta y al avanzar el día las emisiones son dispersadas con mayor intensidad hacia el sur del VRC, comportamiento asociado a la influencia de los vientos del Pacífico que ganan fuerza en el transcurso del día. Este comportamiento puede observarse en los mapas de dispersión del punto 1, donde transcurrida una hora de la inyección de las 16:00 se aprecia una diferencia considerable con respecto a la pluma de dispersión de la inyección de las 08:00. En el punto 2 sobre la ciudad de Cali, a lo largo del día las emisiones presentan una baja dispersión, concentrándose sobre el área urbana de la ciudad, su influencia en cuanto a la dispersión del trazador se observa principalmente con una ligera huella de concentración en la zona sur de Yumbo horas después de la emisión.

El punto 3 con emisiones sobre el municipio de Buga, muestra un patrón de dispersión hacia el norte del VRC, con poco impacto hacia el sur. En el punto 5 ubicado sobre la cordillera Central en el municipio de Palmira, las concentraciones simuladas no descienden propiamente al centro del valle, sino que permanecen sobre la cordillera Central y una parte de ellas se desplazan hasta la cordillera Occidental en niveles verticales superiores, fenómeno que puede estar influenciado por la entrada de los vientos alisios que transportan masas de aire de oriente a occidente por encima de la barrera topográfica que ejerce la cordillera Central. El punto 7 ubicado sobre el municipio de Santander de Quilichao (Cauca), muestra que las emisiones al sur del VRC son transportadas hacia el norte sobre la vertiente oriental de la cordillera Occidental, llegando a los municipios de Jamundí y Cali principalmente.

Por último, las emisiones en el punto 9 ubicado sobre la base de la cordillera Central en el municipio de Palmira, sugieren que durante la mañana y parte de la tarde los contaminantes ascienden sobre la cordillera Central, sin embargo, al transcurrir el día las emisiones son transportadas hacia el sur del VRC sobre el costado occidental de la cordillera Central llegando hasta los municipios del norte del Cauca.

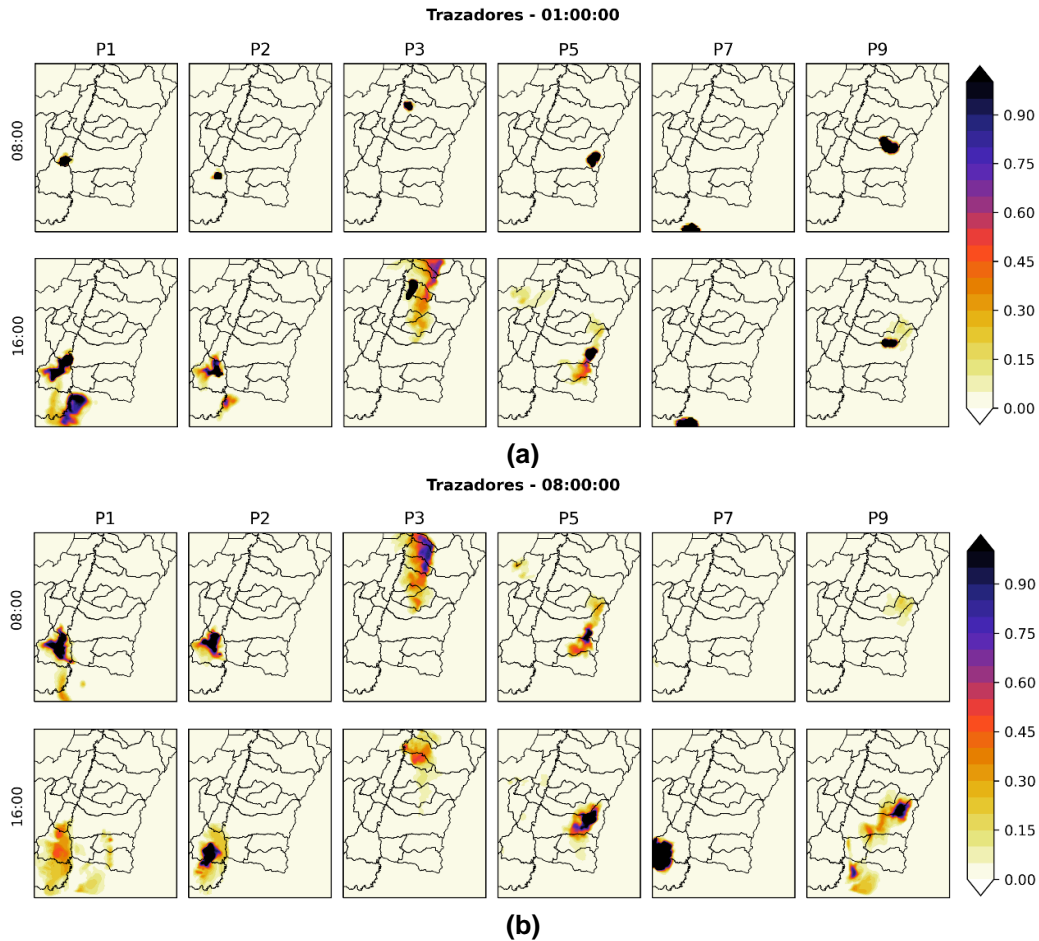


Figura 24. Resultados de simulación con trazadores por pulsos. a) 1 hora posterior a la emisión. b) 8 horas después de la emisión
 Fuente: Elaboración propia

2.2. INVENTARIOS DE EMISIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA

Las fuentes identificadas en el área de influencia para la simulación corresponden a fuentes móviles, fuentes fijas o puntuales y fuentes de área o difusas. Una fuente móvil es toda fuente que es susceptible de desplazarse, por ejemplo, los vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Ministerio de Ambiente, 2017). Las emisiones de los vehículos se originan a partir de dos procesos: la combustión de combustibles fósiles, donde las emisiones son descargadas a través del tubo de escape y de otros procesos que incluyen por ejemplo emisiones evaporativas, la resuspensión del polvo de carretera y el desgaste de frenos o llantas.

Una fuente fija o puntual es aquella fuente situada en un lugar determinado donde los contaminantes al aire se emiten por ductos o chimeneas. Dentro de las fuentes puntuales del inventario regional se incluyen las emisiones asociadas al sector industrial, las

panaderías, los asaderos, las ladrilleras, el almacenamiento de combustible y la producción artesanal de carbón vegetal.

Mientras tanto, las fuentes de área o difusas son aquellas donde los focos de emisión se dispersan en un área, por ejemplo, las quemas abiertas controladas en zonas rurales, las emisiones de actividades de explotación minera a cielo abierto o regiones que por albergar múltiples fuentes fijas de emisión de menor tamaño pueden ser consideradas como un área de emisión (Ministerio de Ambiente, 2017). Los Inventarios asociados a fuentes de área o difusas corresponden a la resuspensión del material particulado en actividades agrícolas, la fertilización agrícola, a las emisiones por exhosto de la maquinaria diésel en la cañicultura, al gas natural residencial, las canteras, las quemas abiertas en precosecha e incendios, rellenos sanitarios y las emisiones pecuarias precursoras de aerosoles secundarios inorgánicos (SIA, por sus siglas en inglés).

Los contaminantes que se tuvieron en cuenta en la estimación para cada inventario en el área de influencia para la simulación corresponden a material particulado menor a 10 micrómetros de diámetro (PM₁₀), material particulado menor a 2.5 micrómetros de diámetro (PM_{2.5}), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x = NO+NO₂), óxidos de azufre (SO_x), compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés), amoníaco (NH₃), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y *Black Carbon* (BC, también conocido como hollín) (Tabla 9).

Tabla 9. Inventarios de emisión desarrollados y contaminantes atmosféricos estimados en el inventario del área de influencia con fines de simulación

Fuente		Contaminante
Fuentes móviles	Exhosto (combustión vehicular)	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , NO _x , N ₂ O, SO _x , CO, BC, CH ₄ y VOC.
	Resuspensión vías pavimentadas	PM ₁₀ y PM _{2.5} .
	Resuspensión vías sin pavimentar	PM ₁₀ y PM _{2.5} .
Fuentes estacionarias	Sector Industrial	PM, CO ₂ , NO _x , SO _x , CO, VOC, CH ₄ y N ₂ O.
	Panaderías	PM _{2.5} , CO ₂ , NO _x , SO _x , CO, VOC, CH ₄ y N ₂ O.
	Asaderos	PM _{2.5} , CO ₂ , VOC, CH ₄ y N ₂ O.
	Ladrilleras	PM, CO ₂ , NO _x , SO _x , CO, VOC y CH ₄ .
	Canteras	PM ₁₀ y PM _{2.5} .
	Producción artesanal de carbón vegetal	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , NO _x , CO, SO _x , BC, CH ₄ , NH ₃ y VOC.
	Almacenamiento de combustibles	VOC.
Fuentes difusas	Estaciones de servicio	VOC.
	Maquinaria agrícola (Combustión en cañicultura)	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO ₂ , NO _x , CO, SO _x , BC, CH ₄ , NH ₃ , N ₂ O y VOC.
	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	PM _{2.5} , CO ₂ , NO _x , SO _x , CO y VOC.
	Quemas abiertas en precosecha e incendios	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, CH ₄ , NO _x , SO _x y VOC.
	Pecuarias precursoras de SIA	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NH ₃ , NMVOC y H ₂ S.
	Gas natural residencial	NO _x y CH ₄ .
Resuspensión por actividades agrícolas	PM ₁₀ y PM _{2.5} .	

Fuente	Contaminante
Canteras	PM ₁₀ y PM _{2.5} .
Rellenos sanitarios	PM ₁₀ , PM _{2.5} y VOC.
Fertilización agrícola	NH ₃ y VOC.

Fuente: Elaboración propia

En esta sección se realiza un análisis comparativo de las emisiones totales anuales obtenidas para cada una de las fuentes de emisión consideradas. La descripción de los procedimientos de estimación de emisiones para cada una de las fuentes que incluye aspectos metodológicos principales, las fuentes de datos utilizados y resultados específicos para cada inventario de emisión se encuentran documentados en los documentos anexos que se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Listado de documentos anexos con descripción detallada de los inventarios de emisión desarrollados en el área de influencia

Nombre del documento	Inventarios incluidos	Documento Anexo
Inventario de emisiones de fuentes difusas en el área de influencia	Resuspensión por actividades agrícolas	Anexo 4
	Fertilización agrícola (cañicultura)	
	Maquinaria agrícola (Combustión en cañicultura)	
	Gas natural residencial	
	Pecuarías precursoras de SIA	
	Rellenos sanitarios	
Inventario de emisiones de fuentes estacionarias en el área de influencia	Sector industrial regional	Anexo 5
	Pequeños establecimientos regionales (Asaderos, EDS y Panaderías)	
	Ladrilleras	
	Almacenamiento de combustibles	Anexo 6
Base de datos para fuentes estacionarias regionales		
Inventario de emisiones de fuentes móviles en el área de influencia	Combustión de fuentes móviles en vías regionales, nacionales e intermunicipales	Anexo 7
	Resuspensión en vías regionales, nacionales, intermunicipales y en los municipios de Palmira y Yumbo	Anexo 8
Inventario de emisiones del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, canteras y producción artesanal de carbón vegetal	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	Anexo 9
	Canteras	
	Producción artesanal de carbón vegetal	
Quemas abiertas en precosecha e incendios	Quemas abiertas en precosecha e incendios	Anexo 10
Fuentes estacionarias en Yumbo y Palmira	Fuentes estacionarias en Yumbo y Palmira	Informe de fuentes estacionarias de Yumbo y Palmira
Fuentes móviles de Yumbo y Palmira	Fuentes móviles de Yumbo y Palmira	Informe de fuentes móviles de Yumbo y Palmira

Fuente: Elaboración propia

Como resultado general, las emisiones totales anuales obtenidas en el área de influencia se resumen en la Tabla 11. Se estimó un total de 10945 toneladas anuales de PM₁₀, 4450 toneladas de PM_{2.5}, 34786 toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x), 28086 toneladas de óxidos de azufre (SO_x), 143110 toneladas de monóxido de carbono (CO), 73304 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (VOC), 12 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) y cerca de 7897 toneladas de amoníaco (NH₃).

La Figura 25 muestra la contribución de cada fuente a las emisiones totales para cada contaminante. Dentro del PM₁₀, la principal fuente es el sector industrial con un 34%, seguido de las quemaduras abiertas en precosecha e incendios con un 17%, la resuspensión en vías con un 13%, la combustión de fuentes móviles con un 12%, el sector pecuario con un 10% y en menor proporción las ladrilleras, canteras y resuspensión por actividades agrícolas. De otra parte, las principales fuentes asociadas a la emisión de PM_{2.5} se relacionan principalmente con el sector industrial con un 36%, seguido de las quemaduras abiertas en precosecha e incendios con un 28% y la combustión por fuentes móviles con 23%.

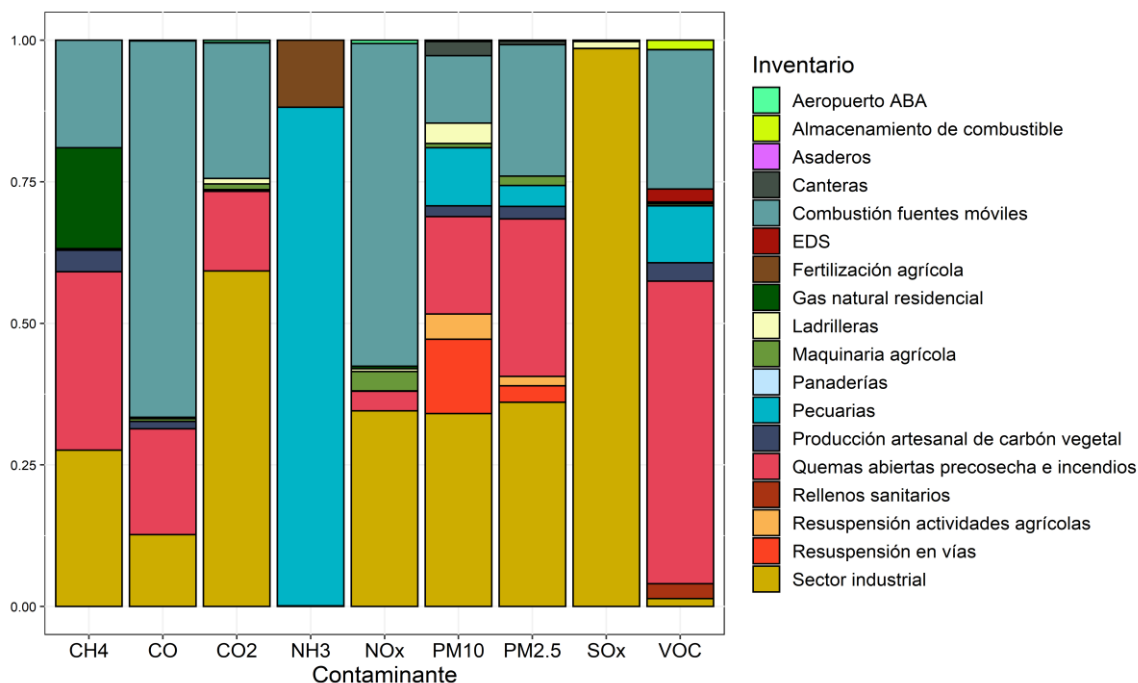


Figura 25. Contribución porcentual a la emisión por tipo de contaminante de las distintas fuentes de emisión consideradas en el área de influencia para la simulación
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Consolidado de los flujos totales anuales de emisión obtenidos en el área de influencia con propósitos de simulación

Fuente		Contaminantes [ton/año]							
		PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x	SO _x	CO	VOC	CO ₂	NH ₃
Fuentes Móviles	Combustión fuentes móviles	1,304.05	1,032.58	19,823.34	55.43	95,123.01	18,027.42	2,864,596.08	NA
	Resuspensión en vías	1,434.93	129.15	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Fuentes estacionarias	Aeropuerto ABA	1.45	1.45	209.62	13.83	195.85	0.37	51,856.77	NA
	Producción de carbón vegetal	207.51	97.53	1.61	3.65	1,857.63	2,383.43	11,845.11	9.03
	Sector industrial	3,729.01	1,605.75	12,014.20	27,670.78	18,157.73	1,012.40	7,085,911.85	NA
	Panaderías	0.43	0.43	21.26	0.64	17.85	1.17	25,501.56	NA
	Asaderos	23.83	6.26	NA	NA	NA	35.89	6,476.70	NA
	EDS	NA	NA	NA	NA	NA	1,676.92	NA	NA
	Ladrilleras	393.46	NA	160.25	341.64	330.14	60.96	115,660.85	NA
	Almacenamiento de combustibles	NA	NA	NA	NA	NA	1,210.58	NA	NA
Fuentes Difusas	Resuspensión en actividades agrícolas	486.49	72.92	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Gas natural residencial	NA	NA	157.1	NA	NA	NA	NA	NA
	Maquinaria agrícola (Combustión en cañicultura)	83.67	73.01	1,189.22	0.78	687.11	251.81	116,329.00	5.62
	Quemas abiertas en precosecha e incendios	1,883.28	1,238.21	1,210.39	NA	26,741.26	39,173.83	1,683,486.11	1,954.66
	Pecuarías precursoras de SIA	1,124.04	164.98	NA	NA	NA	7,374.41	NA	6,951.72
	Canteras	272.65	28.35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Rellenos sanitarios	0.27	0.04	NA	NA	NA	1,921.96	NA	NA
	Fertilización agrícola	NA	NA	NA	NA	NA	173.84	NA	936.56
Total		10,945.08	4,450.68	34,786.99	28,086.75	143,110.59	73,304.99	11,961,664.02	7,897.31

NA: No Aplica

Fuente: Elaboración propia

Dentro de los óxidos de nitrógeno la principal fuente de emisión se relaciona con las fuentes móviles con un 57% y el sector industrial con un 35%. Para los óxidos de azufre las emisiones se atribuyen principalmente al sector industrial, representando el 98.5%. El monóxido de carbono proviene principalmente de la combustión por fuentes móviles con un 66.5%, seguido por las quemaduras abiertas en precosecha e incendios con un 19% y el sector industrial con un 13%. Los compuestos orgánicos volátiles provienen en su mayoría de fuentes móviles y las quemaduras abiertas en precosecha e incendios con un 25% y 53% respectivamente, seguido del sector pecuario con un 10% y una pequeña contribución de las estaciones de servicio y almacenamiento de combustibles, que en conjunto corresponden a un 4%.

Dentro de los gases efecto invernadero, las emisiones de CO₂ se relacionan en un 59% al sector industrial, un 24% con las fuentes móviles y un 14% con las quemaduras abiertas en precosecha e incendios. Las emisiones de metano se atribuyen principalmente a cuatro fuentes principales, las quemaduras abiertas en precosecha e incendios (31.5%), el sector industrial (27.5%), la combustión de combustibles fósiles por fuentes móviles (19%) y al gas natural residencial (18%). Para el amoníaco la principal fuente es el sector pecuario con un 88%, seguido de la fertilización agrícola con el 12%.

En términos del análisis de contribución, el sector industrial contribuye con cerca del 35% a la emisión del material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el área de influencia, donde los municipios del norte del Cauca emiten cerca del 31% de las emisiones destacándose los municipios de Guachené y Miranda. En los municipios del Valle del Cauca, Palmira representa el 14%, Pradera un 10%, Riofrío un 9.1%, El Cerrito un 8% y Yumbo con un 7.6%. De las 1300 toneladas de material particulado producidos por la combustión de fuentes móviles, la ciudad de Cali es responsable del 25%, seguido de las vías nacionales con un 19.9%; y los municipios de Palmira con un 11.7% y Yumbo con un 8.6%; mientras tanto, los municipios del norte del Cauca contribuyen solo con un 3.1%. La información de emisiones por municipio, contaminante y fuente se encuentra disponible en el Anexo 11.

2.3. DESAGREGACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE LOS INVENTARIOS DE EMISIÓN EN EL ÁREA DE INFLUENCIA CON PROPÓSITOS DE SIMULACIÓN

La desagregación espaciotemporal de los diferentes inventarios de emisión elaborados para los municipios de interés (Yumbo y Palmira) y su área de influencia, se realizó de manera independiente para cada una de las fuentes evaluadas. Este procedimiento tuvo en cuenta además la especiación química de las emisiones, con el propósito de llevar las especies químicas agrupadas obtenidas en la estimación (por ejemplo, flujos de material particulado total y VOC) a las especies químicas específicas según los requerimientos del modelo WRF-Chem en cuanto a los mecanismos químicos que fueron objeto de análisis en las simulaciones. Finalmente, fue necesaria la generación de archivos en formato NetCDF que permiten la lectura de las emisiones y su uso como información de entrada en el modelo de calidad del aire.

Como resumen general, la Tabla 12 muestra la metodología de desagregación o agregación espacial y temporal para los diferentes inventarios desarrollados en el área de estudio.

Dentro de la tabla resumen se encuentra un campo denominado “Distribución”, que hace referencia a la distribución temporal horaria de las emisiones en un día típico. Por ejemplo, una distribución uniforme se refiere a que la carga de emisiones es equivalente y se distribuye en intervalos horarios iguales durante el tiempo que se ejecuta la actividad; mientras tanto, en la distribución a partir de flujos vehiculares para fuentes móviles, las emisiones se diferencian en términos de mayor o menor emisión según las horas de mayor o menor flujo vehicular, teniendo en cuenta además el efecto del tráfico según los días de la semana.

Para cada procedimiento de desagregación fueron generados archivos de emisión independientes, cada uno de ellos presentando la información de una fuente específica. A partir de los archivos de emisión individuales, se generó un archivo unificado que presenta las emisiones de todas las fuentes estimadas y que fue posteriormente utilizado como información de entrada en el modelo de calidad del aire WRF-Chem. Para la generación de dicho archivo unificado, se desarrolló un código con comandos NCO, los cuales permiten la sumatoria de archivos de emisiones en formato NetCDF según la ubicación geográfica de las celdas con flujos de emisión en el dominio de simulación.

Para la distribución espacial de emisiones, se generó una cuadrícula con una resolución de 1 km x 1 km, que contiene 110 x 130 celdas que presentan cubrimiento a los municipios de interés y sus áreas de influencia (Figura 26). Esta cuadrícula fue empleada en la desagregación de los diferentes inventarios de emisiones, con el propósito de mantener un marco geográfico igual en todos los escenarios. Es importante aclarar que la resolución espacial de la cuadrícula fue seleccionada para coincidir con la resolución del modelo WRF-Chem en el dominio 3 de simulación (dominio de interés). En términos de la distribución temporal, la resolución horaria fue establecida teniendo en cuenta que el modelo de calidad del aire utiliza esta misma resolución temporal.

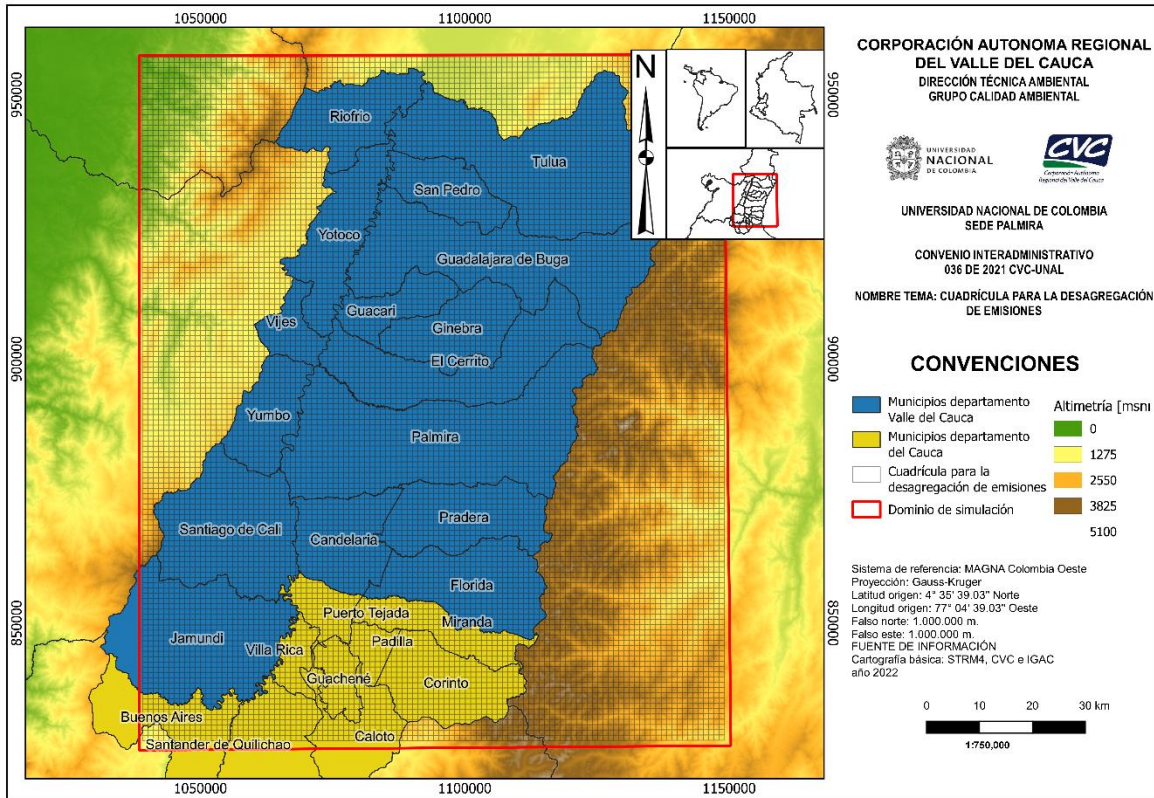


Figura 26. Cuadrícula para desagregación espacial de emisiones
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Metodología usada en la desagregación/agregación espaciotemporal de emisiones en el dominio de simulación asociada con cada inventario de emisiones desarrollado

Fuente		Temporalidad (franja horaria)	Distribución	Metodología de desagregación
Fuentes móviles	Combustión vehicular	24 horas	A partir de los flujos vehiculares diarios y semanales	Agregación en las celdas de 1km x 1km en los municipios de Cali, Palmira, Yumbo, para las emisiones por arcos de vía obtenidas con metodología Bottom-up
	Resuspensión vías pavimentadas			Desagregación de los demás municipios con base en la distribución de la red vial contenida en cada celda de 1km x 1km.
	Resuspensión vías sin pavimentar			
Fuentes estacionarias	Sector Industrial	Según la actividad de cada industria	Uniforme	Agregación de fuentes en las celdas 1 km x 1 km, según ubicación geográfica y

Fuente		Temporalidad (franja horaria)	Distribución	Metodología de desagregación
		asociada con la jornada laboral		coincidencia con celda de simulación.
	Panaderías	18 horas (intervalo de 06:00 a 22:00)		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación para los municipios de Palmira y Yumbo. Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área de las cabeceras municipales para los demás municipios.
	Asaderos	12 horas (10:00 a 22:00)		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación para los municipios de Palmira y Yumbo. Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área de las cabeceras municipales para los demás municipios.
	Ladrilleras	24 horas		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación.
	EDS	24 horas		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación para los municipios de Palmira y Yumbo.

Fuente		Temporalidad (franja horaria)	Distribución	Metodología de desagregación
				Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área de las cabeceras municipales para los demás municipios.
	Producción artesanal de carbón vegetal	24 horas		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación.
	Almacenamiento de combustibles	24 horas		Agregación de fuentes en las celdas 1 x 1 km, según ubicación geográfica y coincidencia con celda de simulación.
Fuentes difusas	Maquinaria agrícola	12 horas (06:00 a 18:00)		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área sembrada según diferentes cultivos presentes en la región.
	Resuspensión por actividades agrícolas	12 horas (06:00 a 18:00)		
	Fertilización agrícola	24 horas		
	Pecuarias precursoras de SIA	24 horas para NH ₃ y VOC.		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área total de cada municipio.
	Pecuarias precursoras de SIA	12 horas para PM ₁₀ y PM _{2.5}		
	Gas natural residencial	18 horas (06:00 a 22:00)		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área de las cabeceras municipales
	Quemas abiertas en precosecha e incendios	1 hora según el horario de quema.		Agregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km según el horario más frecuente de quema y el centro geográfico de la vereda donde se reportó la quema para el Valle del Cauca. Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km según ubicación del área con

Fuente		Temporalidad (franja horaria)	Distribución	Metodología de desagregación
				presencia de cultivos para el departamento del Cauca.
	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	24 horas		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km según ubicación del aeropuerto.
	Rellenos sanitarios	24 horas		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km según ubicación geográfica de los rellenos sanitarios.
	Canteras	12 horas (06:00 a 18:00)		Desagregación de emisiones en las celdas 1 x 1 km en función del área de las canteras identificadas

Fuente: Elaboración propia

2.3.1. Distribución de emisiones por fuentes móviles en Yumbo y Palmira

El inventario de emisiones por fuentes móviles para Yumbo y Palmira fue desarrollado siguiendo una aproximación *bottom-up*, a través de la cual se obtuvieron emisiones desagregadas por arco de vía (ver ejemplo en la Figura 27) y con una distribución temporal horaria, presentando diferenciación entre días típicos (lunes a jueves), viernes, sábado y domingo.

Teniendo en cuenta que la distribución espacial de emisiones a nivel de arco de vía es incompatible con WRF-Chem, fue necesario agrupar espacialmente dichas emisiones en celdas con resolución de 1 km x 1 km, procedimiento conocido como *regridding*. Para llevar a cabo este proceso se generó un código en lenguaje R, que cumple las funciones que se describen a continuación.

El proceso de *regridding* siguió cinco etapas: (1) Se define la ubicación de las diferentes celdas de 1 km x 1 km sobre el dominio del inventario. (2) Se determina que arcos de vía están contenidos dentro de cada una de las celdas previamente definidas. (3) Se estima el porcentaje de la longitud total de cada arco de vía que está contenido en cada celda. (4) Se multiplica el porcentaje de longitud del arco de vía por el total de emisiones de cada contaminante en ese arco de vía, con el fin de determinar la cantidad de emisiones asignadas a cada celda. (5) Se suman las emisiones de cada segmento de arco de vía que se ubiquen dentro de la misma celda. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 28 las emisiones agregadas de CO para las 7 hora local de un día típico, obtenidas a partir de la metodología descrita.

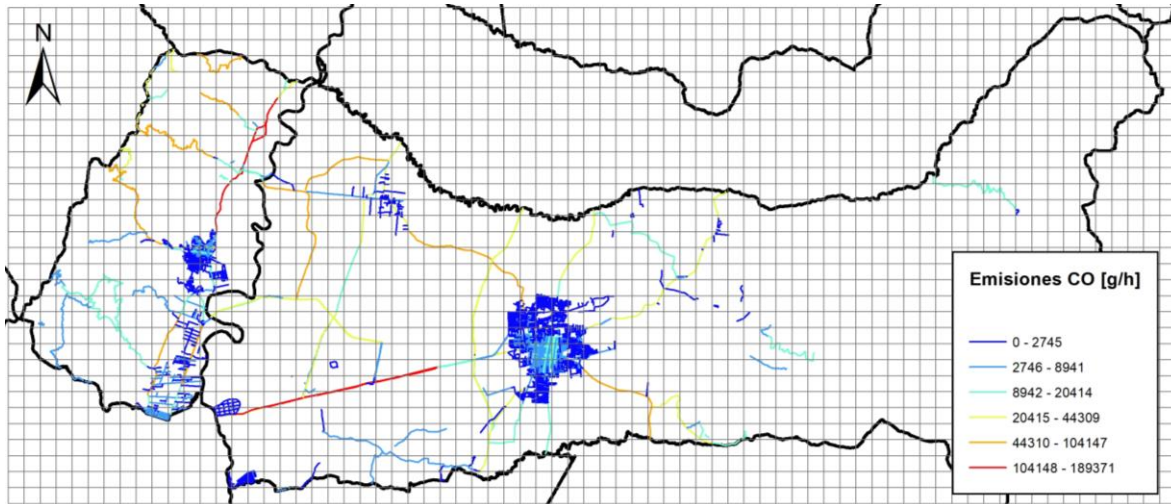


Figura 27. Emisiones de CO a nivel de arco de vía por fuentes móviles en Yumbo y Palmira a las 7 hora local
 Fuente: Elaboración propia.

El código desarrollado permite agregar las emisiones en celdas de 1 km x 1 km con una resolución horaria, manteniendo la diferenciación del inventario para días típicos, viernes, sábado y domingo. La Figura 29 muestra el perfil de emisiones de PM_{2.5} obtenido en el proceso de agregación de fuentes móviles en los municipios de Yumbo y Palmira, donde se observa que el flujo de emisiones es mayor en un día considerado como típico, llegando a máximos de emisión cercanos los 60 kg/km²*h, frente a día de fin de semana como el domingo, que reporta máximos de emisión cercanos a los 35 kg/km²*h.

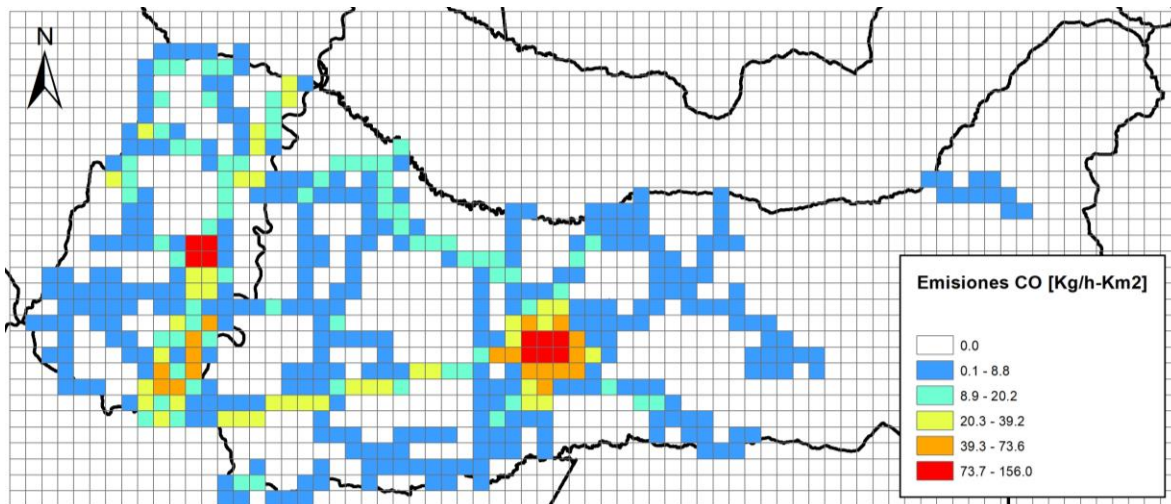


Figura 28. Emisiones de CO por fuentes móviles en Yumbo y Palmira a las 7 hora local, agregadas en celdas de 1 km x 1 km
 Fuente: Elaboración propia.

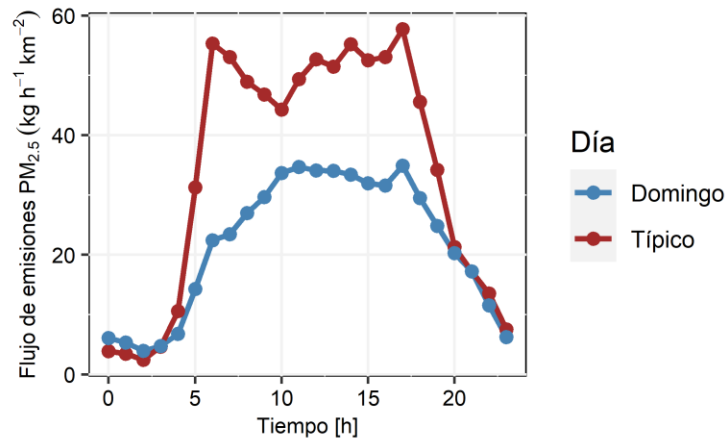


Figura 29. Distribución temporal de emisiones horarias de $PM_{2.5}$ para el inventario de fuentes móviles de los municipios de Palmira y Yumbo (en conjunto) para un día típico de semana (línea roja) y domingo (línea azul)
Fuente: Elaboración propia.

De otra parte, el código desarrollado permite generar los archivos en formato de texto plano, en los cuales se relaciona las coordenadas geográficas (latitud y longitud) del centroide de cada una de las celdas en el dominio, junto con el valor de emisión de los diferentes compuestos considerados para cada celda. Posteriormente estos archivos son transformados al formato NetCDF, el cual es compatible con el modelo WRF-Chem, con ayuda de un preprocesador de emisiones denominado PyChEmiss (<https://github.com/quishqa/PyChEmiss>).

La estrategia y códigos desarrollados para la agregación de emisiones a nivel de arco de vía en celdas de 1 km x 1 km permitió finalmente validar la conservación de masa durante el proceso de desagregación y verificar que la asignación espacial y temporal de las emisiones fueran consistentes. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 30 las emisiones de CO a diferentes horas para un día típico obtenidas luego del proceso de agregación en celdas de 1 km x 1 km.

Se evidencia que los puntos con mayores niveles de emisión se concentran sobre los centros poblados de Palmira y Yumbo. Adicionalmente, se aprecia además las emisiones en las vías que conectan a Cali con los municipios previamente mencionados. En lo que respecta a la distribución temporal, las emisiones se dan mayormente entre las 6 y las 20 horas, con picos de emisión a las 6 y 18 horas.

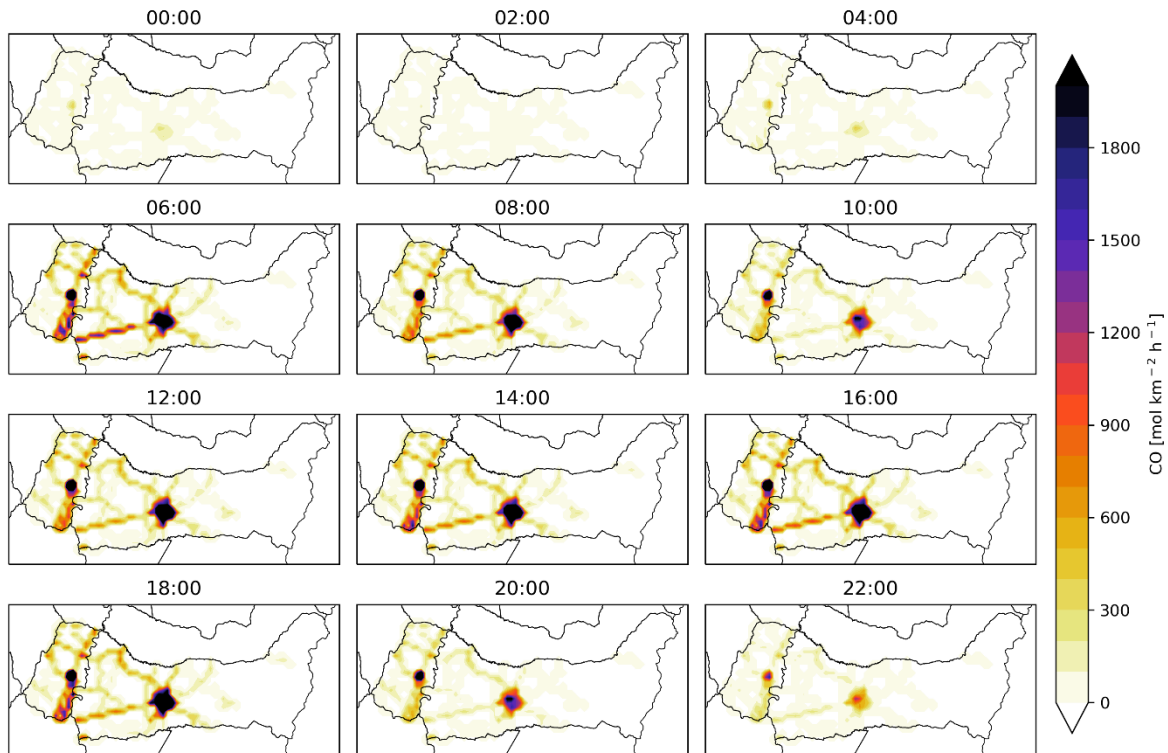


Figura 30. Emisiones de CO por fuentes móviles en Yumbo y Palmira para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio en celdas de 1km x 1km.
Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Distribución de emisiones por fuentes móviles en Cali y demás municipios del área de influencia

A diferencia del inventario por fuentes móviles sobre Yumbo y Palmira, el inventario por fuentes móviles en los demás municipios del área de influencia fue desarrollado siguiendo una aproximación *top-down*. Esto significa que las emisiones totales anuales son obtenidas para una región completa y debe ser distribuidas espacial y temporalmente siguiendo una estrategia de desagregación.

Dicho proceso fue llevado a cabo utilizando el algoritmo de desagregación DROVE (González et al., 2020) a partir de dos aproximaciones distintas. Para las emisiones del municipio de Cali, se usó la opción de desagregación 3 de DROVE, la cual distribuye las emisiones en función de los flujos vehiculares a nivel de arco de vía. Por otro lado, para la distribución de emisiones de los municipios restantes se utilizó la opción 2, en la cual se usa como base de distribución la longitud de arcos de vía y la tipología de vías (primaria, secundaria o terciaria), asignando un factor de peso basado en el comportamiento general del tráfico por tipo de vía. En este caso no fue posible emplear la opción 3 como en Cali, por ausencia de información requerida de flujos vehiculares.

Posterior al proceso de desagregación, al igual que para Yumbo y Palmira, se realizaron códigos computacionales que permiten la especiación química de emisiones y la

generación de archivos .txt que puedan ser alimentados al preprocesador de emisiones PyChEmiss.

Como ejemplo de resultados, se presentan en las Figura 31 y Figura 32 las emisiones de CO desagregadas para un día típico. Los resultados sugieren la relevancia que tienen las emisiones de Cali a nivel regional, pues los valores máximos de emisión de CO sobrepasan los $4000 \text{ mol km}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mientras que las emisiones en los otros municipios no sobrepasan los $500 \text{ mol km}^{-2} \text{ h}^{-1}$. En este resultado se encuentran excluidos los municipios de Yumbo y Palmira.

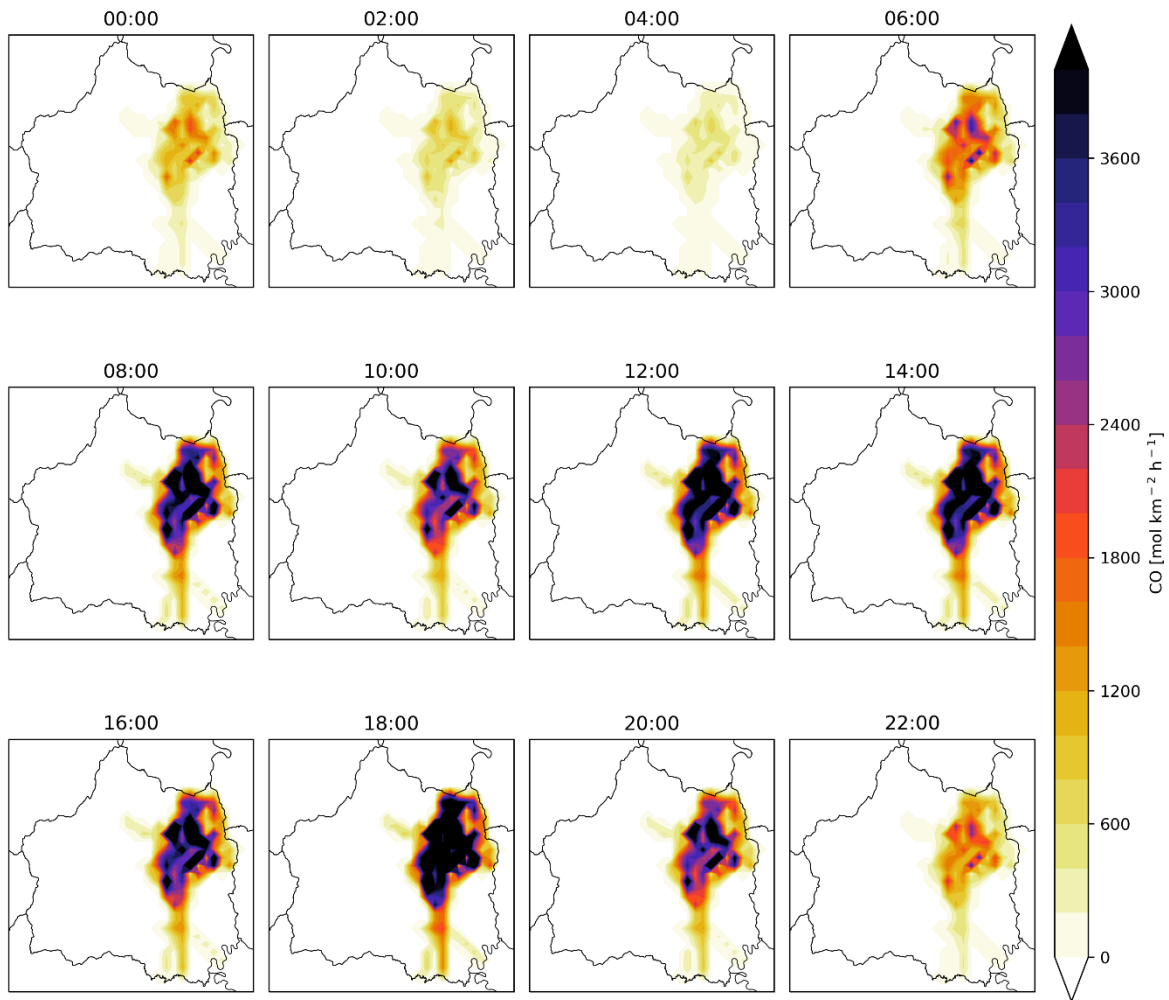


Figura 31. Emisiones de CO por fuentes móviles en Cali para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio
 Fuente: Elaboración propia.

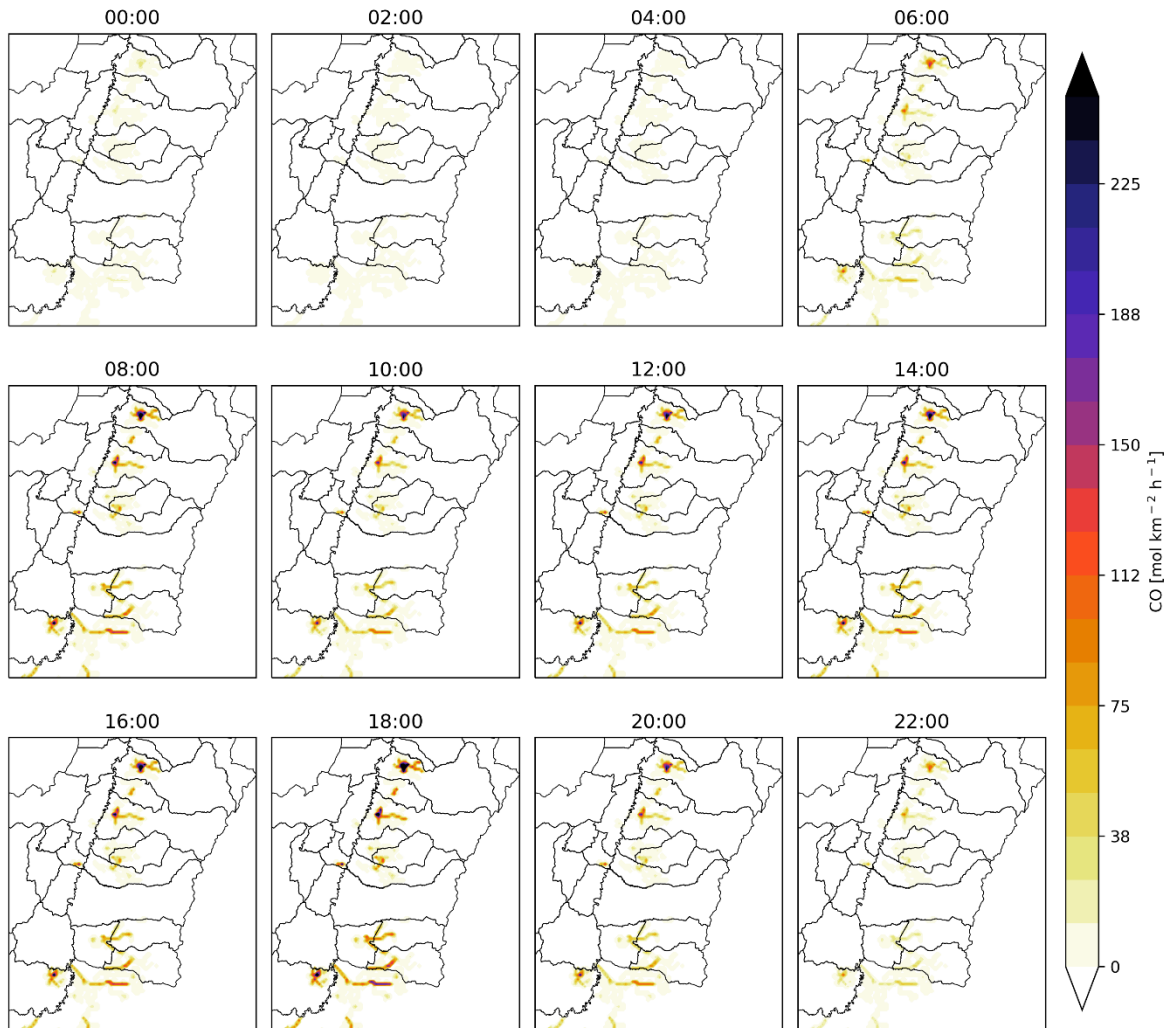


Figura 32. Emisiones de CO por fuentes móviles en otros municipios del área de influencia para un día típico, desagregadas en tiempo y espacio
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Distribución de emisiones para fuentes estacionarias puntuales

Las emisiones de los inventarios por fuentes fijas o puntuales para los municipios del área de influencia se agregaron en celdas de 1 km x 1 km a través de códigos computacionales en lenguaje R, permitiendo tener un perfil horario y espacial de las emisiones. Dentro de las fuentes fijas se encuentran el sector industrial, las ladrilleras, tanques de almacenamiento de combustibles y la producción artesanal de carbón vegetal. Se incluyen en este grupo también los inventarios de panaderías, asaderos y estaciones de servicio desarrollados para los municipios de Palmira y Yumbo.

Los códigos desarrollados leen las bases de datos de emisiones y generan un archivo de emisión sobre el área de influencia asociado con la ubicación las celdas que contienen las diferentes fuentes, teniendo en cuenta el horario en el cual se realiza la actividad y la

especiación química del material particulado y los compuestos orgánicos volátiles (VOC), este último proceso requerido dentro de la información de entrada del modelo WRF-Chem según el mecanismo químico a emplear.

Las emisiones de CO, SO_x, NO_x, NH₃, PM_{2.5}, PM₁₀, PST, VOC, NH₃, CO₂, CH₄ y N₂O fueron ingresadas al código en términos de emisiones anuales (toneladas / año) y a partir del nivel de actividad de cada fuente estas fueron desagregadas en flujos horarios. Es importante aclarar que cada fuente tiene un horario diferencial en cual se reportan sus emisiones (como se describe en la Tabla 12), por ejemplo, para la producción artesanal de carbón vegetal se asume que las quemadas se realizan durante 24 horas continuas, mientras que para el sector industrial la distribución horaria depende de cada industria y las jornadas de trabajo reportadas. Es importante aclarar además que en el sector industrial es común que, dentro de la información levantada para elaborar el inventario, no se cuente con datos específicos de los horarios de funcionamiento de los equipos fuente; por lo tanto, se debe asumir esta actividad basada en la jornada laboral de la empresa o, en el caso de no tener esta información, se asume como el horario promedio del sector industrial total. Además, para el sector industrial se debe tener en cuenta la altura efectiva de la emisión, ya que, para chimeneas con alturas superiores a 60 metros sobre el nivel del suelo, las emisiones se incluyeron en el segundo nivel vertical del modelo de simulación. Un ejemplo del perfil de distribución horario obtenido en los municipios de Palmira y Yumbo se presenta en la Figura 33, donde se observa un comportamiento típico de meseta común en distribuciones horarias de inventarios de fuentes industriales.

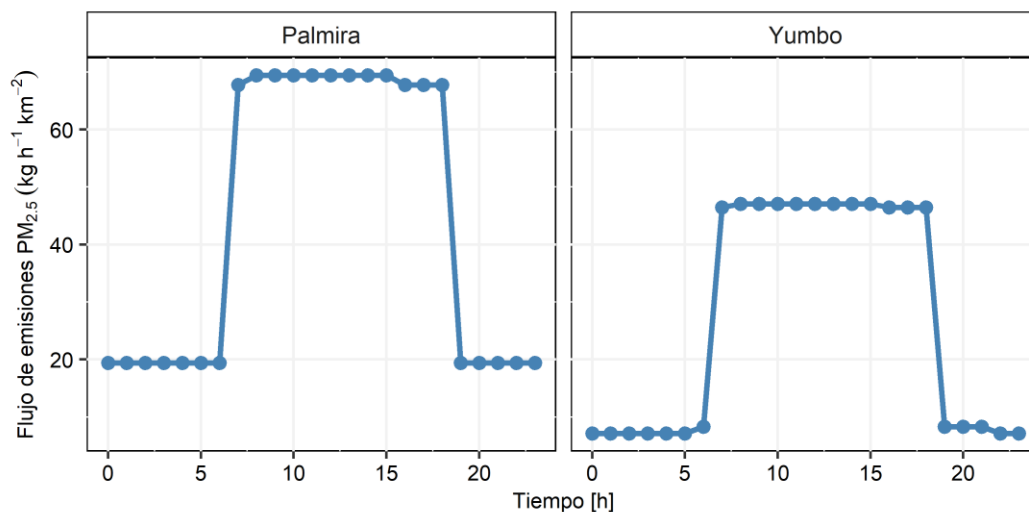


Figura 33. Distribución de emisiones para el PM_{2.5} del sector industrial para los municipios de Palmira y Yumbo.

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado final, se realizó un aseguramiento de calidad para verificar que los resultados de los códigos computacionales garanticen la conservación de la masa y permitan tener archivos individuales en formato .txt con información de cada contaminante ingresado en una resolución horaria y su respectiva especiación química, información requerida para la simulación de calidad del aire en el área de estudio.

La Figura 34 muestra el resultado de la agregación de emisiones de $PM_{2.5}$ a las 12 hora local para el inventario de los sectores industriales de Yumbo (panel superior) y Palmira (panel inferior), en el cual se observan las zonas donde hay una mayor concentración de emisiones industriales. Para Yumbo estas se concentran al suroriente y oriente de la cabecera municipal, mientras que en Palmira se observan focos de emisiones al norte y noroccidente del municipio y en menor medida en el centro de la cabecera municipal.

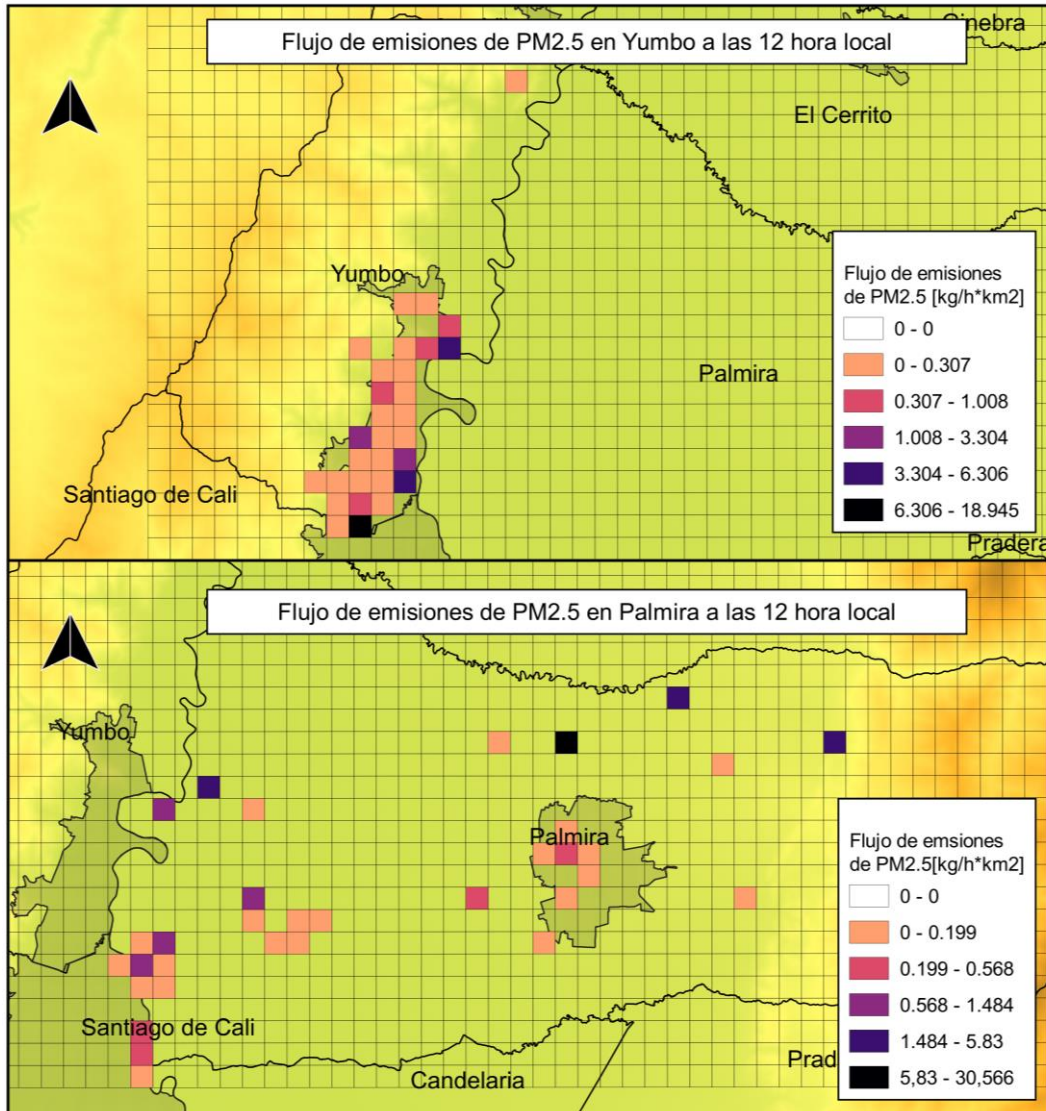


Figura 34. Emisiones de $PM_{2.5}$ para los sectores industriales de Yumbo (panel superior) y Palmira (panel inferior) a las 12 hora local (-5 UTC).

Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Distribución de emisiones por quemas abiertas en precosecha e incendios

Como información base para la estimación y desagregación de emisiones por quemas abiertas en precosecha e incendios, se utilizó un archivo suministrado previamente al equipo de trabajo donde se contaba con registros de la fecha, hora de inicio, hora de finalización y área quemada de los procesos de quemas abiertas en precosecha e incendios para el 2018. A partir de dicha información, se estimaron las emisiones en todo el VRC manteniendo 2018 como el año base del inventario y utilizando la aproximación de factores de emisión, relacionando los valores de actividad a partir del área reportada de quema. Además, se contó con información sobre la ubicación geográfica, latitud y longitud de cada evento, relacionando el corregimiento en el que se presentaron las quemas, útil en la desagregación espacial de las emisiones.

Del total de registros analizados (11195), el 16 % de ellos no contaron con información de hora de inicio y/o hora final de las quemas, parámetros importantes para determinar la duración de los episodios. Por lo tanto, previo al proceso de agregación de emisiones en celdas de 1 km x 1 km, se realizó un llenado de datos faltantes utilizando la media de los registros analizados. Los resultados obtenidos en función del análisis de la distribución de las horas de inicio y duración de quemas (Figura 35), sugieren una hora de inicio media alrededor de las 17 horas y una duración media de 27 minutos por quema.

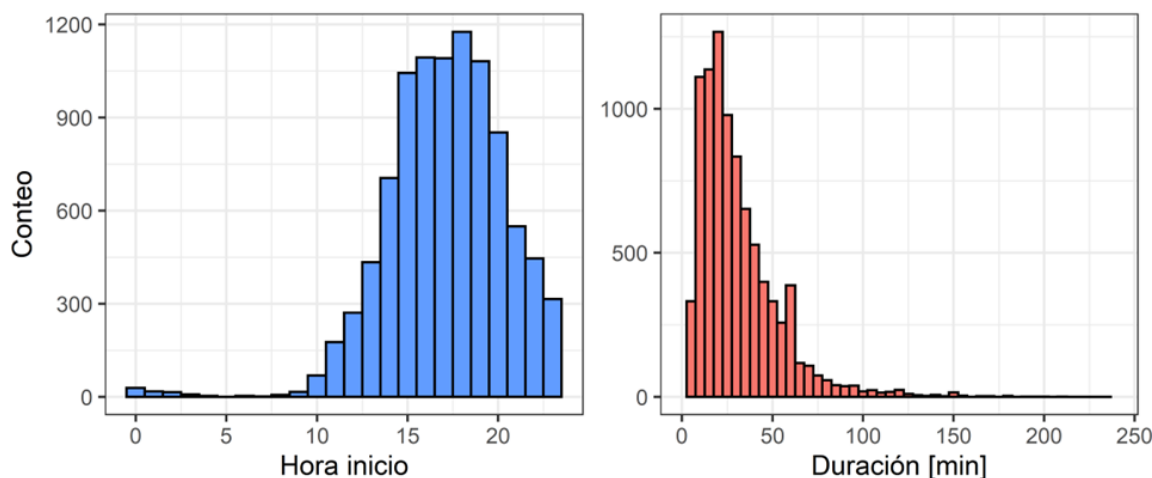


Figura 35. Histograma de hora de inicio y duración de los episodios de quema precosecha e incendios

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se generó un código en R que permite la agregación de emisiones en celdas de 1 km x 1 km. El código permite identificar la fecha y hora de inicio de cada una de las quemas registradas. A partir de los datos de latitud y longitud de los corregimientos, se asocian las emisiones a la celda en las cuales estas coordenadas están contenidas. En la implementación de este código se decidió distribuir las emisiones de cada episodio durante una hora, esto se debe a que, si bien la duración media de las quemas es de 27 minutos, la resolución mínima del modelo es de una hora.

Una vez distribuidas las emisiones, el código permite la especiación química del material particulado y VOC, al igual que la exportación de archivos en formato .txt que alimentan el preprocesador de emisiones PyChEmiss, permitiendo generar en última instancia un archivo NetCDF apto para utilizar en el modelo WRF-Chem.

En la Figura 36 se muestra un ejemplo de las emisiones $PM_{2.5}$ desagregadas para agosto de 2018, donde se identifican diferentes episodios de quema durante el día. Al igual que en los casos mencionados anteriormente, se validó la conservación de masa durante todo el proceso y se realizó un riguroso procedimiento de aseguramiento de calidad en la información resultante.

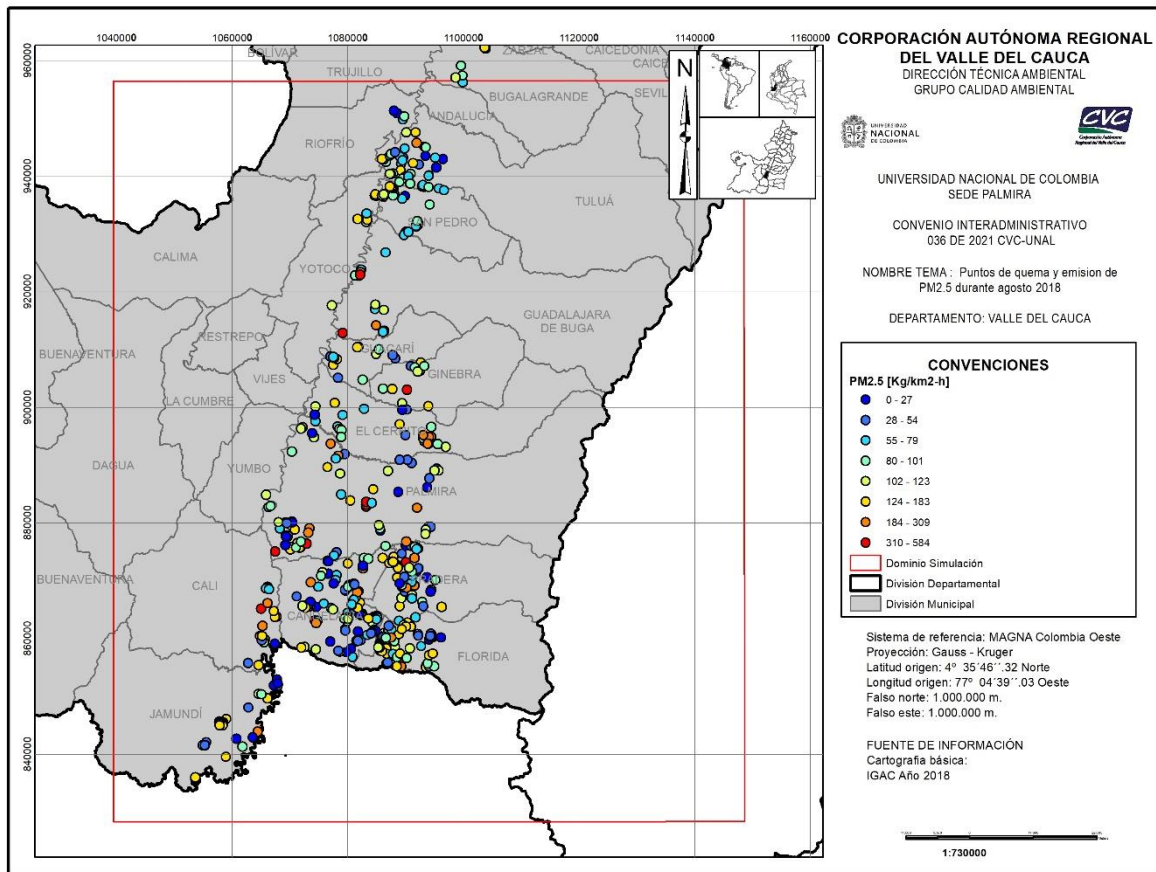


Figura 36. Emisiones de $PM_{2.5}$ por quemas abiertas en precosecha e incendios durante agosto de 2018.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.5. Distribución de emisiones para fuentes difusas

A diferencia de las anteriores fuentes, los códigos para desagregar las emisiones por fuentes de área o difusas se asocian a un área específica, donde las emisiones se distribuyen teniendo en cuenta el número de celdas y el área contenida en cada celda. Dentro de los inventarios incluidos en este procedimiento, se encuentran las emisiones por

resuspensión del material particulado por actividades agrícolas, maquinaria agrícola (combustión en cañicultura), fertilización agrícola, rellenos sanitarios, canteras, gas natural residencial, el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, emisiones pecuarias y quemas abiertas en pre cosecha e incendios en el departamento del Cauca, este último incluido en este grupo debido a la imposibilidad de contar con información de horas de inicio, final y ubicación aproximada de las quemas. Adicionalmente, se incluyeron los inventarios de panaderías, EDS y asaderos de los municipios diferentes a Palmira y Yumbo, teniendo en cuenta que no se contó con datos específicos de ubicación para las fuentes individuales de dichos inventarios.

Las áreas tomadas como referencia corresponden al área sembrada de los cultivos más relevantes en la región, las áreas de los centros poblados principales de cada municipio, las áreas específicas de canteras, rellenos sanitarios y el aeropuerto. Las áreas sembradas fueron obtenidas de los archivos tipo *shapefile* de cobertura y usos del suelo de la CVC para los municipios del Valle del Cauca y el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) para los municipios del Cauca. El archivo obtenido de la CVC permite desagregar las emisiones en función de los cultivos, por lo tanto, teniendo en cuenta que para el área de influencia el 75% está sembrado con caña de azúcar, se optó por agregar emisiones en dos categorías: caña de azúcar y otros cultivos. Mientras tanto, el archivo del IGAC presenta la información de área sembrada total para el departamento, es decir, sin distinción de cultivos, por lo tanto, las emisiones fueron distribuidas en una sola categoría general asociadas a los municipios de Cauca (Figura 37).

La desagregación de emisiones en función del área de los centros poblados principales se aplicó para los inventarios de panaderías, EDS, asaderos y gas natural residencial. Sin embargo, se debe tener en cuenta que algunos centros poblados del norte del departamento del Cauca se encuentran fuera o parcialmente fuera del dominio de simulación mostrado anteriormente, por lo tanto, las emisiones para los centros poblados como Santander de Quilichao y Buenos Aires, se asignaron a una región semejante dentro de los bordes del dominio de simulación, mientras tanto, para el centro poblado de Corinto, el cual se encuentra parcialmente fuera del dominio, las emisiones se asignaron a las celdas que alcanzan a estar incluidas dentro del dominio de simulación.

Los códigos permitieron realizar la especiación química del material particulado y compuestos orgánicos volátiles según el mecanismo químico seleccionado para su uso en el modelo; además, al igual que en los anteriores inventarios se realizó la verificación de la conservación de masa.

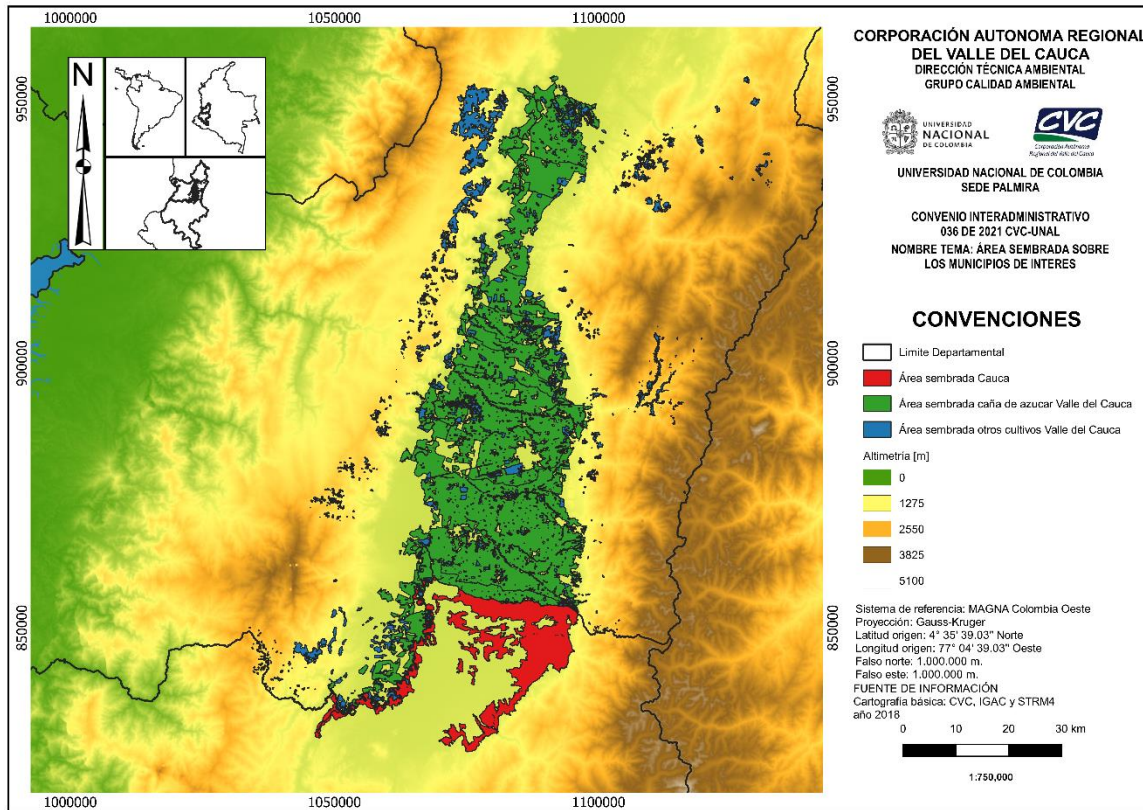


Figura 37. Área sembrada de los cultivos más representativos para los municipios de interés
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 38 muestra como ejemplo las emisiones de PM_{10} por resuspensión de actividades agrícolas en el área de influencia. Como resultado sobre el departamento del Cauca, las emisiones se distribuyen homogéneamente, debido a la imposibilidad de agregar las emisiones en función de los cultivos; mientras tanto, sobre el Valle de Cauca se observa que la región con menor altitud sobre el VRC presenta un mayor flujo de emisiones en comparación con los cultivos de mayor altitud, debido principalmente a la presencia de la caña de azúcar sobre el VRC.

Como se mencionó en el ejercicio de fuentes fijas, las emisiones de las fuentes de área muestran un comportamiento homogéneo durante la ejecución de su actividad. La Figura 39 muestra un ejemplo del perfil de emisiones de $PM_{2.5}$ para los inventarios por resuspensión de material particulado para actividades agrícolas y el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón.

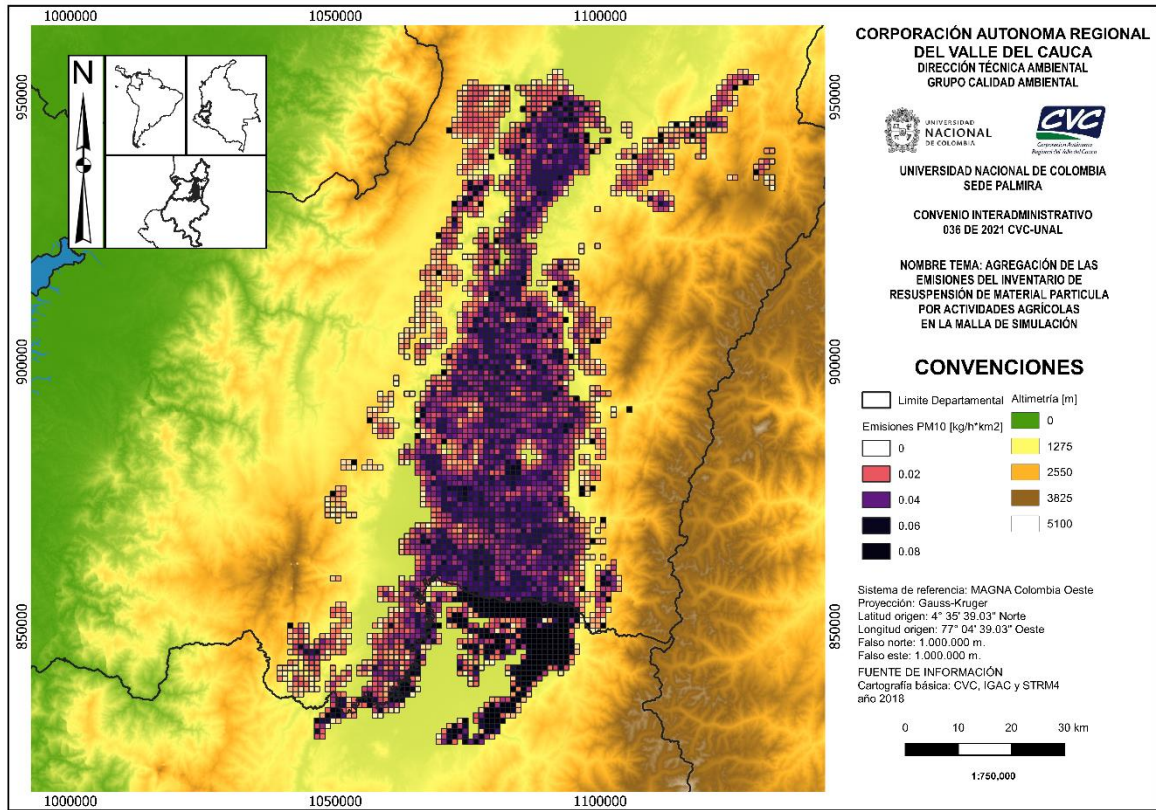


Figura 38. Distribución de emisiones de PM₁₀ por resuspensión en actividades agrícolas sobre los municipios del área de influencia a las 12:00 hora local (-5 UTC)
Fuente: Elaboración propia.

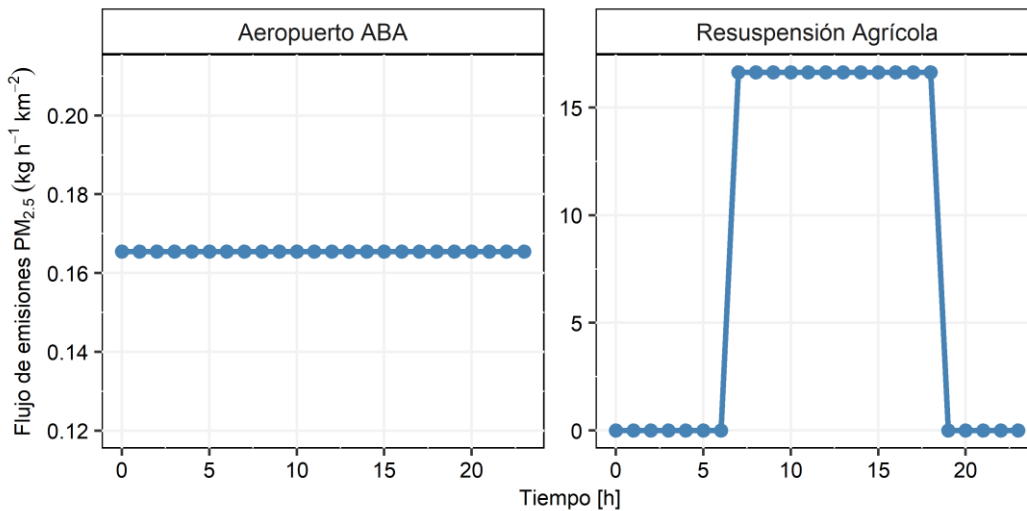


Figura 39. Distribución temporal de emisiones por fuentes estacionarias difusas de PM_{2.5} en los inventarios de resuspensión por actividades agrícolas y el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón
Fuente: Elaboración propia.

2.3.6. Generación de archivo unificado de emisiones

Producto de los procesos de desagregación descritos previamente, fueron generados 36 archivos en formato de texto plano asociados a cada fuente de emisión considerada. Dichos archivos se describen en la Tabla 13 y se adjuntan en el Anexo 12 del presente informe.

Tabla 13. Resumen de archivos de emisiones para diferentes fuentes desagregadas espaciotemporalmente y con especiación química para el mecanismo RACM-MADE/VBS.

ID	Inventario de emisiones	Nombre del archivo de emisiones	Fecha de inicio	Número de días	Grilla de simulación
1	Aeropuerto ABA	AER_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
2	Asaderos de Palmira	ASA_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
3	Asaderos de Yumbo	ASA_YUM_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
4	Asaderos Regionales	ASA_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
5	EDS de Palmira	EDS_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
6	EDS de Yumbo	EDS_YUM_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
7	EDS Regionales	EDS_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
8	Gas natural residencial	GNR_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
9	Panaderías de Palmira	PAN_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
10	Panaderías de Yumbo	PAN_YUM_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
11	Panaderías Regionales	PAN_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
12	Producción artesanal de carbón vegetal	PIL_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
13	Resuspensión por actividades agrícolas	AGR_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
14	Maquinaria agrícola (combustión en cañicultura)	DIE_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
15	Almacenamiento de combustibles	ALM_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
16	Canteras	CAN_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
17	Ladrilleras Palmira	LAD_PAL_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
18	Ladrilleras Regionales	LAD_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
19	Sector pecuario material particulado	PMA_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo

ID	Inventario de emisiones	Nombre del archivo de emisiones	Fecha de inicio	Número de días	Grilla de simulación
20	Sector Pecuario Bovino	BOV_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
21	Sector Pecuario Porcicola	POR_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
22	Sector Pecuario Avícola	AVI_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
23	Fertilización Agrícola	FER_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
24	Rellenos Sanitarios	REL_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
25	Sector industrial Regional	IND_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
26	Sector industrial Palmira	IND_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
27	Sector industrial Yumbo	IND_YUM_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
28	Sector industrial Cali	IND_CAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
29	Móviles Yumbo y Palmira	MOV_PAL_RACM	30/07/2018	7	Palmira y Yumbo
30	Móviles Cali	MOV_CAL_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
31	Móviles municipios área de influencia	MOV_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
32	Móviles Vías Nacionales	MOV_NAC_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
33	Quemas abiertas en pre cosecha e incendios Valle del Cauca	QUE_VAL_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
34	Quemas abiertas en pre cosecha e incendios Cauca	QUE_CAU_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
35	Resuspensión en vías Yumbo y Palmira	RD1_PAL_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo
36	Resuspensión en vías regionales	RD1_REG_RACM	30/07/2018	7	Dominio completo

Fuente: Elaboración propia.

Los archivos independientes generados fueron empleados para alimentar el preprocesador de emisiones PyChEmiss, y así generar archivos de emisiones en formato NetCDF compatibles con WRF-Chem. Asimismo, a través de la implementación de comandos NCO, se realizó una sumatoria de los archivos de emisión individuales y se generó un archivo unificado de emisiones. Como muestra gráfica de este archivo unificado, se presenta en la Figura 40 las emisiones totales diarias para un día laboral típico de diferentes contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, VOC, NO_x y SO_2). De otra parte, la Figura 41 muestra las emisiones horarias $PM_{2.5}$ para un día típico, al incorporar todas las fuentes de emisión desagregadas. De las dos imágenes previamente mencionadas, se destaca que los mayores focos de emisión en el área de influencia están asociados con los municipios de

Cali, Yumbo y Palmira; y en menor medida, los centros poblados de los municipios de Tuluá y Guadalajara de Buga.

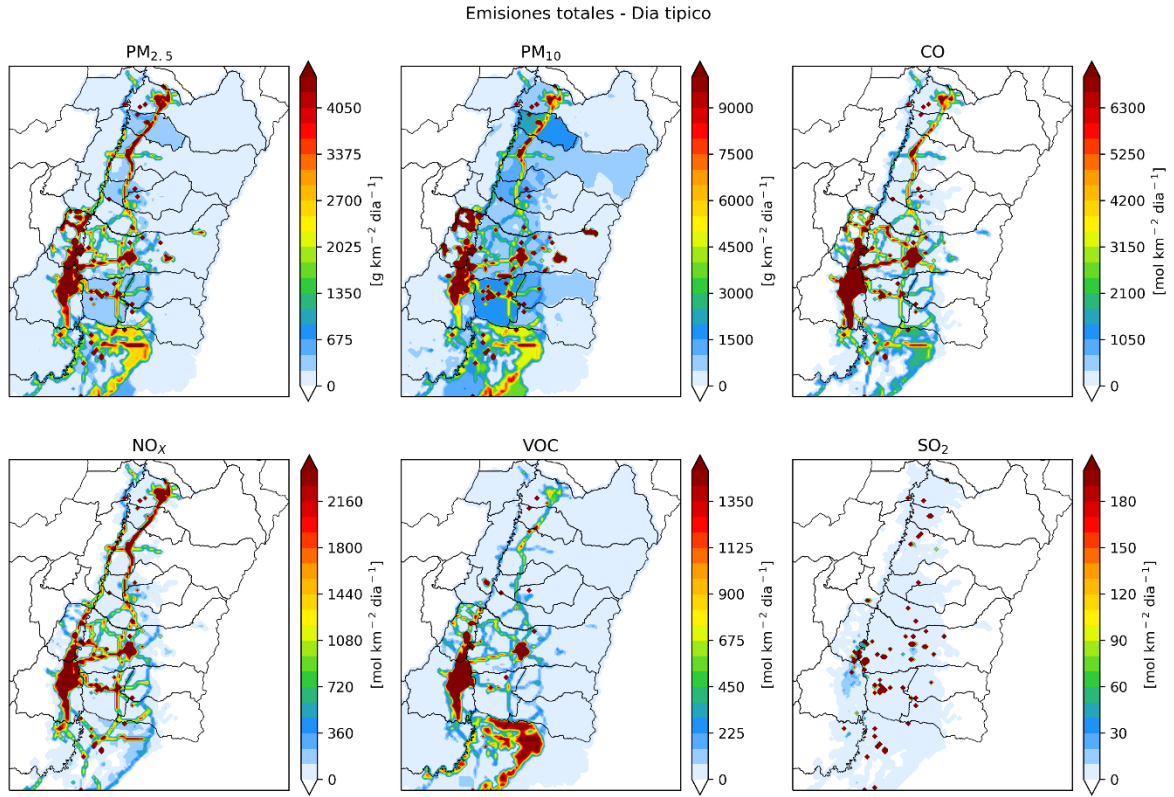


Figura 40. Emisión total diaria de PM_{2.5}, PM₁₀, CO, VOC, NO_x y SO₂ en el área de influencia para la simulación en un día laboral típico
 Fuente: Elaboración propia.

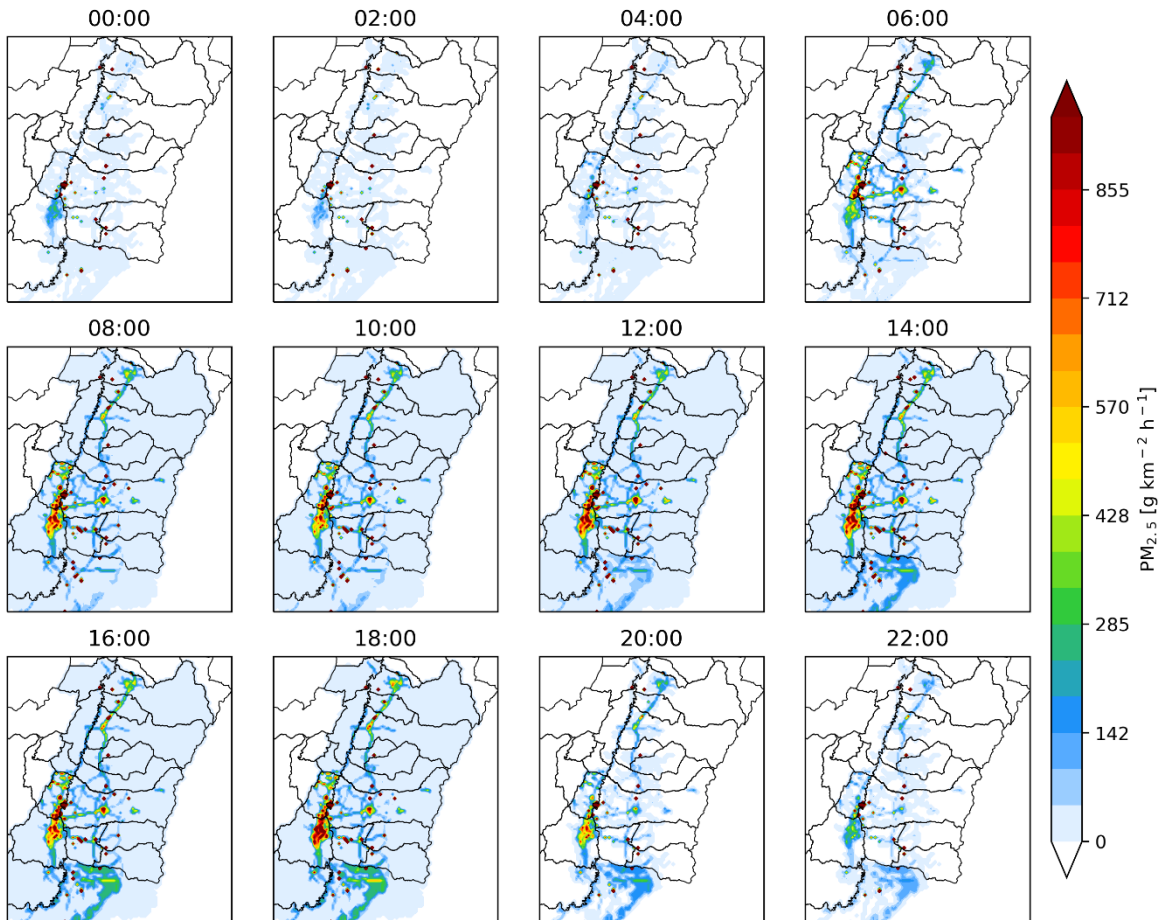


Figura 41. Representación de la distribución espacial y temporal de emisiones horarias de $PM_{2.5}$ en el área de influencia para la simulación en un día laboral típico.
Fuente: Elaboración propia.

Con fines comparativos, se muestran los resultados obtenidos en el inventario del área de influencia para la simulación y el producto del inventario de emisiones globales EDGAR-HTAP para las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Figura 42). El inventario global EDGAR-HTAP (disponible en <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>), presenta una resolución espacial de 0.1° (~10 km) y distribución temporal de un día, en comparación con el inventario en el área de influencia estimado en el presente Convenio que cuenta con una resolución espacial de 1 km y temporalidad horaria. Se observa claramente como se obtuvo un mayor detalle en la representación de diversos focos de emisión tanto espacial como temporalmente, en comparación con un producto global como EDGAR-HTAP, que distribuye dos grandes focos de emisión, el primero y más grande sobre el municipio de Cali (área urbana y rural) y un segundo foco al occidente del centro urbano de Palmira. Por el contrario, en el inventario del área de influencia se distinguen con mayor nivel de detalle regiones con mayores emisiones como las áreas urbanas de Cali, Yumbo y Palmira, además de varios tramos viales en el área de estudio. Esta mejor resolución espaciotemporal de las emisiones permite tener una simulación de calidad del aire con mayor detalle y realismo en función de

la dinámica espaciotemporal de las fuentes de emisión predominantes en la región de estudio y sus emisiones asociadas.

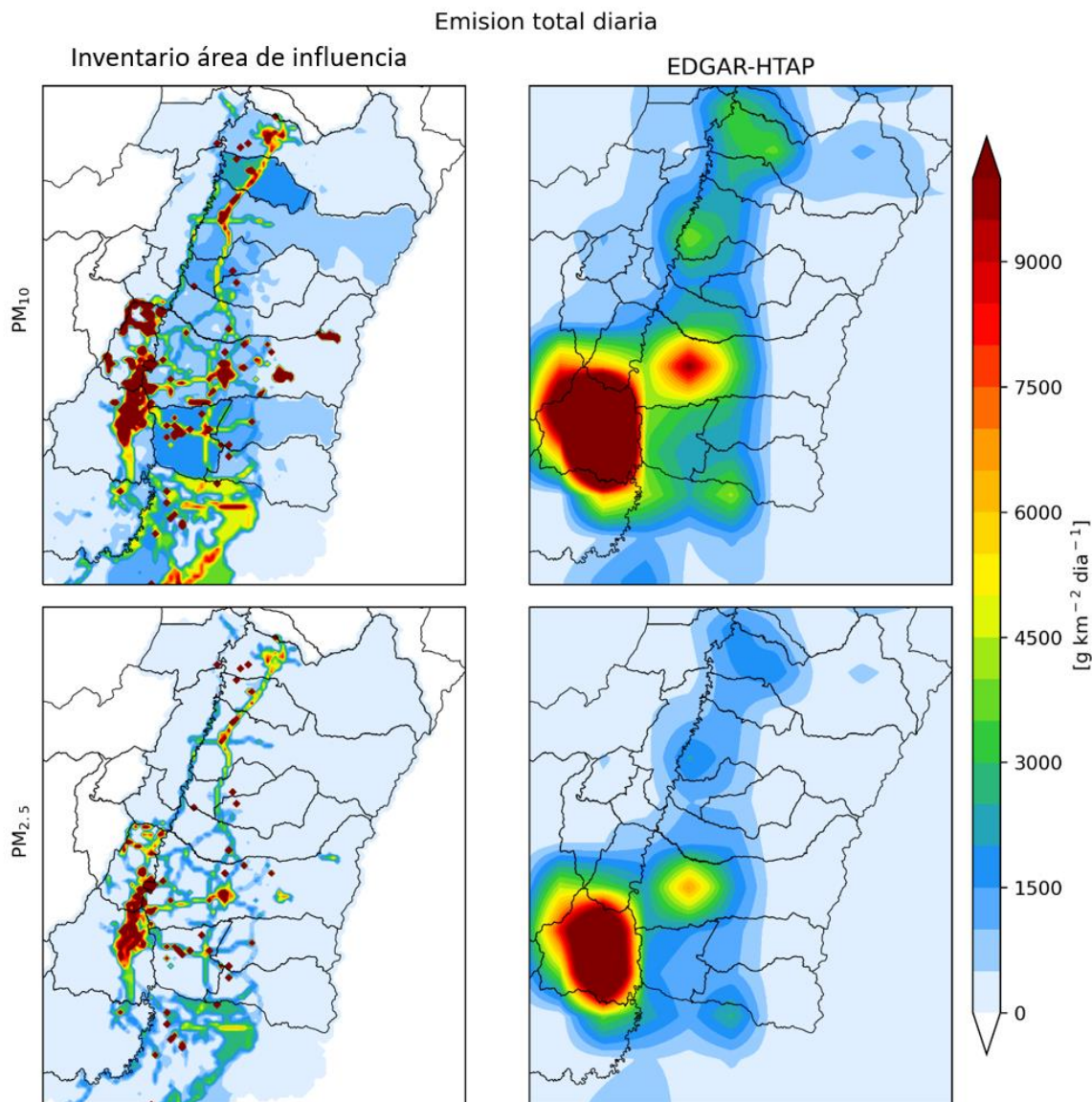


Figura 42. Comparación de inventarios de emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}. Panel izquierdo inventario de emisiones estimado en el área de influencia. Panel derecho inventario de emisiones global EDGAR-HTAP

2.3.7. Especiación del material particulado y los compuestos orgánicos volátiles

Adicional al proceso de agregación/desagregación de emisiones en las celdas de simulación, los códigos computacionales fueron estructurados para realizar la especiación química de las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles y el material particulado. Este proceso es fundamental ya que el modelo de simulación WRF-Chem no permite el

ingreso de estas agrupaciones de compuestos, por el contrario, se requiere una discriminación de especies químicas. Por ejemplo, para el mecanismo RACM los VOC deben ser discriminados en 18 especies, como isopreno, alcanos, alquenos internos, alquenos terminales, aldehídos, cetonas, xileno, tolueno, entre otros. Para el material particulado se requiere especificar por ejemplo la distribución dentro de la emisión del contenido de materia orgánica, carbono elemental, especies como sulfatos, nitratos, entre otros. Para realizar esta discriminación de especies se multiplica la emisión total de VOC, o material particulado según sea el caso, por un factor de especiación, el cual fue extraído de literatura científica.

Para el material particulado se tomó como referencia los valores de distribución porcentual del estudio realizado por Mateus-Fontecha et al (2022). En este estudio se realizó la caracterización de la composición química del material particulado (PM_{2.5}) sobre el municipio de Palmira. En la Tabla 14 se presentan las especies requeridas por el modelo de simulación y los valores porcentuales asociados a estas especies según el estudio de Mateus-Fontecha et al (2022).

Tabla 14. Composición del material particulado usado como información de entrada en el modelo de simulación de calidad del aire

Compuesto	Distribución porcentual [%]
Sulfatos (SO ₄)	12.7
Nitratos (NO ₃)	3.5
Materia orgánica (MORG)	24.2
Carbono elemental (EC)	7.1
Sodio (Na)	1.5
Cloro (Cl)	0.1
Amonio (NH ₄)	3.7

Fuente: tomado de (Mateus-Fontecha et al., 2022)

Según la compilación de los inventarios en el área de influencia, las principales fuentes de VOC son las quemadas abiertas en precosecha e incendios con 39173 toneladas al año (53.4%), las fuentes móviles con 18027 toneladas (24.6%), el sector pecuario con 7374 toneladas (10.1%), las emisiones evaporativas por combustibles (almacenamiento de combustibles y EDS) con 2,887 toneladas (3.9%), la producción artesanal de carbón vegetal con 2383 toneladas (3.2%) y finalmente los rellenos sanitarios con 1921 toneladas (2.6%). Con el fin de tener una especiación de VOC lo suficientemente detallada para su uso en los ejercicios de simulación, se realizó una revisión bibliográfica identificando los diferentes compuestos químicos que se emiten en cada uno de los inventarios anteriormente expuestos; con posibilidad de ser agrupados en los compuestos que son incluidos en el esquema de especiación química definido para el ejercicio de simulación de calidad del aire. En el Anexo 13 se encuentran las diferentes especiaciones químicas para cada inventario según el mecanismo químico RACM, definido para su uso en la simulación de calidad del aire tal como se describirá en el capítulo 3.

2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las simulaciones con emisiones hipotéticas de inyección de trazadores sobre los diferentes municipios cercanos a Yumbo y Palmira permitieron evaluar dinámicas de transporte regional de contaminantes y establecer si las emisiones originadas en los distintos puntos de inyección podrían impactar eventualmente la calidad del aire sobre Yumbo y Palmira. Este ejercicio proporcionó insumos para definir el área de influencia para la simulación de calidad del aire, región sobre la cual cobra importancia la información de emisiones de contaminantes atmosféricos. Tras el análisis de resultados, se estableció que el área de influencia para la simulación está limitada por las cordilleras Occidental y Central, hacia el norte por los municipios de Tuluá y Riofrío; y hacia al sur por el municipio de Santander de Quilichao (departamento del Cauca).

Como resultado general sobre la contribución de fuentes a las emisiones de material particulado, de las 10900 toneladas de PM_{10} y 4450 toneladas de $PM_{2.5}$ emitidas en el área de influencia, las principales fuentes que impactan la región corresponden al sector industrial con un 34% de PM_{10} y 36% de $PM_{2.5}$, las quemas abiertas en precosecha e incendios con un 17% de PM_{10} y 28% de $PM_{2.5}$; y las fuentes móviles con un 12% de PM_{10} y 23% de $PM_{2.5}$. En segundo orden se encuentran las emisiones por resuspensión en vías, el sector pecuario, las ladrilleras, las canteras, la resuspensión de material particulado por actividades agrícolas y la producción artesanal de carbón vegetal. Las emisiones asociadas al aeropuerto ABA, asaderos, panaderías, almacenamiento de combustibles y rellenos sanitarios tienen una contribución menor en la región.

Las emisiones de compuestos como VOC y NH_3 son de gran importancia, ya que estos compuestos tienen la capacidad de formar material particulado secundario (orgánico e inorgánico) a través de diversas reacciones en la atmósfera. Dentro de los VOC la principal contribución se obtuvo para las quemas abiertas en precosecha e incendios con 39173 toneladas anuales, representando el 53% del total de las emisiones, seguido de la combustión por fuentes móviles en ruta con 18027 toneladas (24.6%) y las emisiones del sector pecuario con 7374 toneladas (10%). Frente a las emisiones de NH_3 , el sector pecuario aporta el 88% de las emisiones totales con 6951 toneladas anuales, seguido por las emisiones asociadas al uso de fertilizantes en la agricultura (cañicultura) con 936 toneladas (11.8%).

El proceso de desagregación espaciotemporal de emisiones por las distintas fuentes tenidas en cuenta en el área de influencia permitió obtener emisiones horarias distribuidas en celdas de 1 km x 1 km que cubren todo el dominio de simulación de interés. Dichas emisiones fueron especiadas, principalmente en lo que respecta a las emisiones de material particulado y VOC, para cumplir con los requerimientos del modelo WRF-Chem y el mecanismo químico base a emplear. Asimismo, fue posible trasladar toda esta información a archivos de emisión en formato NetCDF requerido para incorporar los flujos de emisión en el modelo WRF-Chem para la posterior simulación de calidad del aire y el estudio de contribución de fuentes a las concentraciones de material particulado en los municipios de interés como Yumbo y Palmira.

Cada uno de los inventarios de emisión desarrollados presenta un nivel de incertidumbre asociado al factor de actividad y a los factores de emisión usados. A pesar de esto, los

inventarios desarrollados permiten tener un panorama general con la mayor rigurosidad posible (en función de la información y tiempo disponible) de como cada fuente podría contribuir a la contaminación del aire a nivel regional. Como parte de la reducción de la incertidumbre de los inventarios, se recomendaría en futuras estimaciones realizar una estimación más rigurosa del nivel de actividad para ciertas fuentes de emisión.

En el caso de los inventarios para el sector industrial, las quemas abiertas en precosecha e incendios y fuentes móviles; la estimación estuvo basada en las jornadas laborales, horarios de quemas específicos y flujos vehiculares respectivamente. Se podría considerar que esta información ofrece una representación específica de los niveles de actividad. En este sentido, la disminución de la incertidumbre se enfocaría en los inventarios con un menor impacto, pero en los cuales algunos valores de actividad fueron obtenidos de información agregada o con un intervalo amplio de selección. Por ejemplo, en el inventario de la producción artesanal de carbón vegetal, los volúmenes de las pilas a quemar varían entre 3 y 100 m³, tomando como referencia el promedio de 24 m³. Para el inventario de ladrilleras, la diversidad de hornos y la producción diferencial de cada uno, hace complejo la determinación del tiempo de quemas y el flujo de emisiones asociadas. La estimación del inventario por resuspensión de material particulado en actividades agrícolas se basó en factores de emisión en suelos con bajos porcentajes de humedad, por ende, una mayor posibilidad de resuspensión de material particulado. Por lo tanto, con el fin de reducir la incertidumbre sería importante ajustar las estimaciones teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada fuente en el área de estudio. El ajuste de información de actividad en la región es un procedimiento complejo, teniendo en cuenta la diversidad de fuentes y procesos, sin embargo, se considera importante destacar este aspecto para futuras actualizaciones de los inventarios de emisiones.

CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

INTRODUCCIÓN

Los modelos de calidad del aire representan de una forma simplificada los numerosos procesos físicos y químicos que ocurren en la atmósfera, y permiten establecer relaciones de causa-efecto entre la emisión de contaminantes y su concentración en aire ambiente. Es por esta razón que los modelos de calidad del aire son una herramienta fundamental para el entendimiento y gestión del recurso aire, ya que a través de la implementación de estos es posible comprender las dinámicas y causas asociadas a las condiciones actuales de la calidad del aire, evaluar posibles estrategias de reducción de emisiones y su impacto, así como generar herramientas de pronóstico para advertir a la población de futuros eventos de contaminación, entre otras posibles aplicaciones.

Ahora bien, los procesos atmosféricos ocurren en una amplia variedad de escalas espaciales y temporales, y como tal existe una gran variedad de modelos que se adecuan a las necesidades específicas que se desean estudiar. En particular, para estudios a escala urbana o un nivel regional, es recomendable emplear modelos eulerianos de transporte químico (CTMs por sus siglas en inglés). Estos modelos regionales toman en consideración patrones de emisión complejos, meteorología, transformaciones químicas y procesos de remoción de contaminantes en la atmósfera para relacionar el efecto de las emisiones con la concentración de contaminantes en aire ambiente (Seinfeld & Pandis, 2006).

El modelo WRF-Chem es un tipo de CTM de estado del arte, el cual ha sido implementado ampliamente a nivel mundial para estudiar la calidad del aire a escala local y regional. Su gran acogida se debe a que es un modelo de código libre con amplia documentación disponible, al igual que es un modelo de última generación robusto y detallado. Este modelo ha sido empleado previamente en estudios para otras regiones de Colombia (Cifuentes et al., 2021; González et al., 2018; Kumar et al., 2016; Nedbor-Gross et al., 2017) y fue seleccionado para el presente estudio de calidad del aire sobre los municipios de Yumbo y Palmira.

La confiabilidad de los resultados que ofrecen los modelos de calidad del aire depende en gran medida del nivel de detalle y precisión de la información de entrada que es alimentada a estos, teniendo gran relevancia la información sobre emisiones. Las emisiones pueden ser incluidas en las simulaciones utilizando inventarios globales (por ejemplo, productos como RETRO o EDGAR-HTAP), sin embargo, este tipo de inventarios poseen una resolución temporal y espacial relativamente baja, al igual que una alta incertidumbre en la determinación de emisiones para algunas áreas específicas con dinámicas de emisión complejas. De otra parte, es posible utilizar inventarios estimados localmente a través de los cuales se alcanza una mayor resolución, y en los que se implementan factores de

emisión y datos de actividad más detallados y realistas para las características propias de la región a evaluar, lo cual reduce la incertidumbre no solo de los inventarios sino también de los resultados finales en la simulación de calidad del aire.

Tras lo expuesto anteriormente, el presente capítulo se enfoca en describir los aspectos metodológicos y resultados obtenidos en la aplicación y evaluación del modelo WRF-Chem para simular la calidad del aire con enfoque principal sobre los municipios de Yumbo y Palmira. En términos generales, el proceso de simulación de calidad del aire se estructura en 3 etapas que se resumen en la Figura 43: 1) Definición de los parámetros de configuración del modelo para llevar a cabo la simulación en la región objeto de estudio y análisis de sensibilidad para selección del mecanismo químico que mejor represente dinámicas de contaminantes como el material particulado. 2) Simulación base con la totalidad de emisiones estimadas en el área de influencia para la simulación, como insumo para evaluar los posibles sesgos del modelo y analizar las dinámicas de dispersión, transporte y transformación de contaminantes en la región de estudio. 3) Ejercicio de análisis de sensibilidad para estudiar la contribución de fuentes principales de emisión a las concentraciones de material particulado, principalmente sobre los municipios de Yumbo y Palmira.

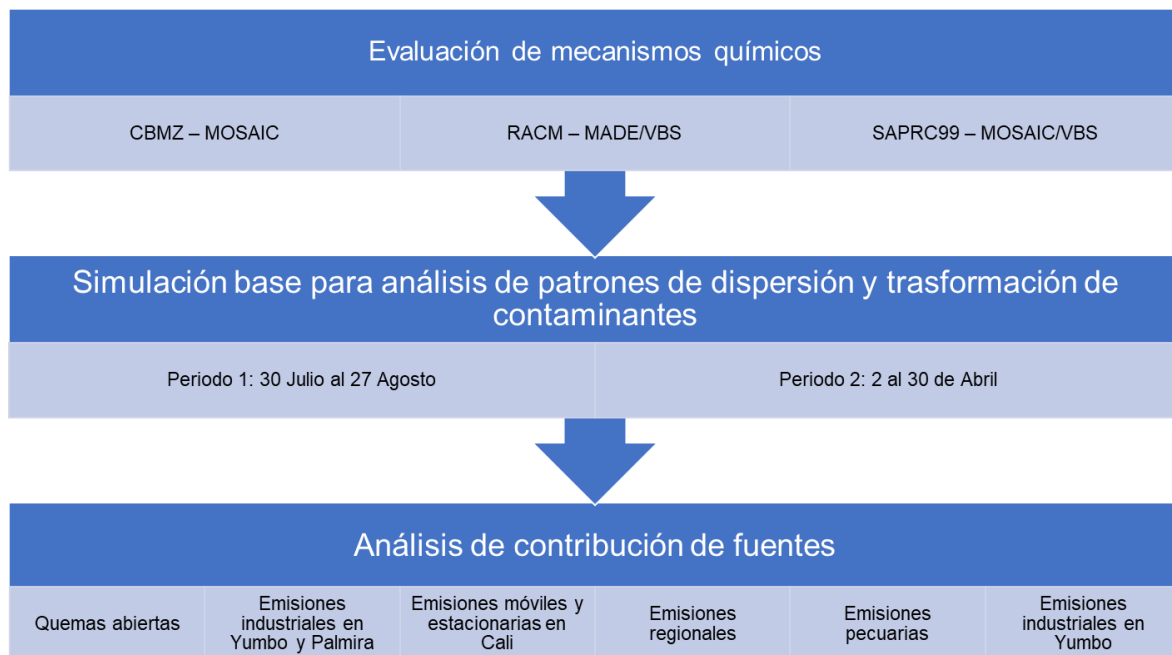


Figura 43. Esquema general del componente de simulación de calidad del aire y análisis de contribución de fuentes

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente capítulo se estructura de forma tal que se presentan conjuntamente los aspectos metodológicos y resultados obtenidos para cada uno de los componentes descritos previamente, asociados con las etapas secuenciales de simulación de calidad del aire llevadas a cabo en desarrollo del Convenio.

3.1. CONFIGURACIÓN BASE DEL MODELO DE SIMULACIÓN WRF-Chem

La configuración de dominios, información estática y meteorológica de entrada (condiciones iniciales y de contorno), así como la estructura de los esquemas seleccionados en relación con las distintas parametrizaciones físicas del modelo WRF fueron establecidas durante un riguroso proceso de análisis de sensibilidad llevado a cabo durante la vigencia 2021, procedimiento que es descrito en detalle en el informe “Modelación de material particulado identificando la contribución de las fuentes - vigencia 2021”. Es importante destacar que para el ejercicio de simulación de calidad del aire se mantuvo la configuración de 3 dominios anidados con relación de anidamiento de 1:5 entre ellos. Dicha configuración se presenta en la Figura 44, esquema en el cual se parte de un dominio padre (D1) con resolución horizontal de 25 km x 25 km, seguido por un dominio intermedio (D2) con resolución de 5 km x 5 km, y finalmente un dominio objetivo o de interés (D3) con 1 km x 1 km de resolución espacial, dominio en el cual se cubren los municipios de Palmira, Yumbo y su área de influencia.

De otro lado, las condiciones iniciales y de contorno químicas fueron extraídas del modelo global CAM-Chem, siguiendo las recomendaciones de ejercicios de simulación de calidad del aire previamente desarrollados en la ciudad de Manizales (Cifuentes et al., 2021; González et al., 2018). En la Tabla 15 se resume la información empleada para obtener la configuración base del modelo de calidad del aire en términos del diseño de dominios de simulación, información meteorológica y química de entrada, parametrizaciones físicas, así como posibles mecanismos químicos y esquemas de aerosoles que fueron objeto de análisis de sensibilidad.

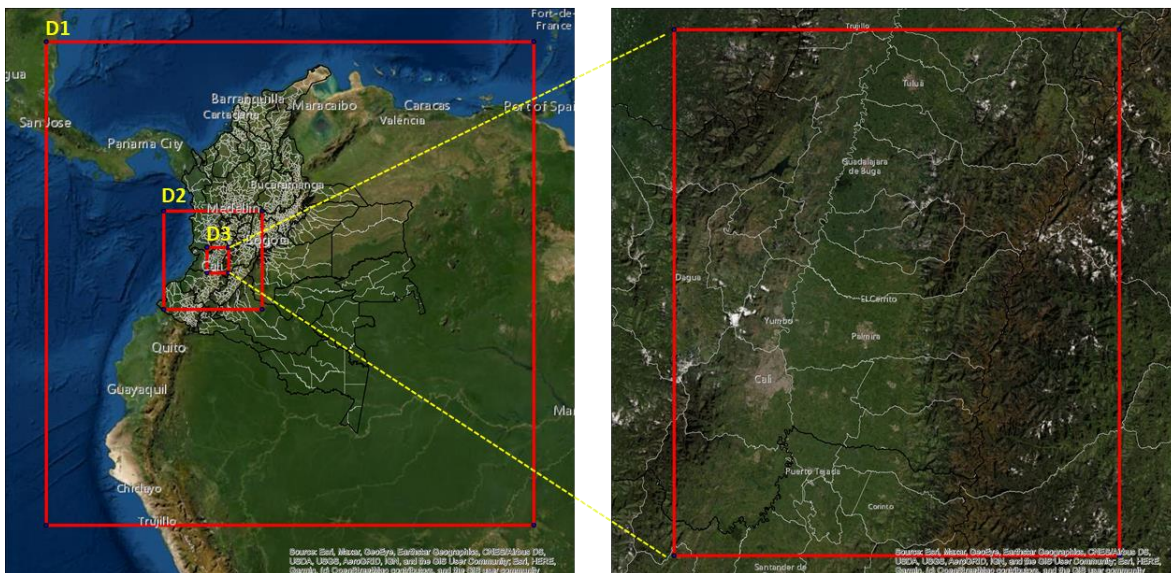


Figura 44. Configuración de dominios de simulación (derecha) y acercamiento sobre el dominio objetivo (izquierda) para la simulación de calidad del aire
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Configuración del modelo WRF-Chem para la simulación de calidad del aire con el componente químico activado

Parámetro	Configuración base
Configuración de dominios	Tres dominios anidados con una relación de anidamiento de 1:5
Niveles verticales	35 niveles desde la superficie hasta 50 hPa
Datos estáticos	Topografía: SRTM4
	Usos del suelo: MODIS 20 Categorías
Condiciones iniciales y de contorno meteorológicas	NCEP CFSv2 (0.25° de resolución espacial; 6 h de resolución temporal)
Condiciones iniciales y de contorno químicas	CAM-Chem
Técnica de anidamiento	One-way
Parametrizaciones físicas	
Microfísica	WSM6
Cúmulos	Grell-Freitas
Capa límite planetaria	MYNN3
Radiación de onda larga	RRTM
Radiación de onda corta	Dudhia
Capa superficial	Noah-LSM
Interacción tierra- superficie	Monin–Obukhov
Inventarios de emisiones	
Antropogénicas	EDGAR-HTAP (D2) – Inventario en el área de influencia (D3)
Biogénicas	MEGAN (D2 y D3)
Polvo – erosión eólica	GOCART dust scheme (D2 y D3)
Parametrizaciones químicas	
Fotólisis	Fast-J
Mecanismo químico*	CBMZ RACM SAPRC99
Esquema de aerosoles*	MOSAIC MADE/VBS MOSAIC/VBS

* Parámetros que varían en función de los análisis de sensibilidad realizados

Fuente: Elaboración propia.

3.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA SELECCIÓN DEL MECANISMO QUÍMICO Y ESQUEMA DE AEROSOLES

El modelo WRF-Chem ofrece una variedad de mecanismos químicos en fase gaseosa y esquemas de aerosoles que tienen diferentes grados de complejidad, y que pueden ser empleados según las necesidades específicas en la simulación atmosférica a realizar. Los mecanismos químicos en fase gaseosa definen las especies químicas y reacciones en las cuales estarán involucradas, así como las constantes de reacción respectivas. Dentro de la definición de especies químicas, se establecen las agrupaciones de especies de importancia en la química atmosférica como lo son por ejemplo los compuestos orgánicos

volátiles (VOC). De otro lado, la selección del esquema de aerosoles determina si estos serán representados de manera agrupada, por bins o modal, así como posibles modelos de formación de material particulado secundario. En conjunto, los mecanismos químicos y esquemas de aerosoles interfieren de manera directa en las predicciones de concentración de contaminantes gaseosos y de aerosoles resultantes de la simulación, así como en la composición y propiedades físicas de estos últimos (Balzarini et al., 2015; Mar et al., 2016; Zhang et al., 2012).

Teniendo en cuenta lo anterior, la selección adecuada de un mecanismo químico y esquema de aerosoles para una simulación dada es un paso fundamental, ya que de esto dependerá la posibilidad de representar de la forma más precisa posible la química atmosférica del área de estudio. Hay que aclarar que no existe un mecanismo químico ideal, y las opciones disponibles varían ampliamente en nivel de detalle, complejidad y demanda de recursos computacionales, con lo cual la selección de un mecanismo químico generalmente involucra un compromiso entre la eficiencia en términos computacionales y la precisión en la representación de la química atmosférica del área de estudio a evaluar.

Como parte del Convenio se evaluaron tres mecanismos químicos con su respectivo esquema de aerosoles: CBMZ – MOSAIC, RACM – MADE/VBS y SAPRC99 – MOSAIC/VBS.

3.2.1. Mecanismos químicos evaluados

Tras una revisión bibliográfica detallada, se definieron algunos de los mecanismos utilizados ampliamente para simular el material particulado con el modelo WRF-Chem, los resultados obtenidos en la consulta bibliográfica permitieron identificar algunos estudios donde se utilizan los mecanismos CBMZ – MOSAIC (Fry & Sackinger, 2012; Wang et al., 2009; Zhou et al., 2019), RACM – MADE/VBS (Bahreini et al., 2018; Barbet et al., 2016; Berger et al., 2016; Tuccella et al., 2015) y SAPRC99 – MOSAIC/VBS (Li et al., 2011; Mao et al., 2021; Xing et al., 2019). Se diseñó entonces un esquema de análisis de sensibilidad que permitiera evaluar el desempeño de cada uno de estos mecanismos para representar la calidad del aire en el área de estudio y evaluar su eficiencia en términos computacionales. Un resumen general de las principales características de los tres mecanismos objeto de estudio se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Características principales de los mecanismos químicos a evaluar en el análisis de sensibilidad

Característica / Mecanismo	CBMZ-MOSAIC	RACM-MADE/VBS	SAPRC99-MOSAIC/VBS
# Especies químicas	67	77	78
# Reacciones	176	237	211
Agrupación de COVs	Según enlaces de carbono	Según reactividad frente al OH	Según reactividad frente al OH
Esquemas de aerosoles	Bins de tamaño	Modal (Aitken, acumulación, grueso)	Bins de tamaño

Característica / Mecanismo	CBMZ-MOSAIC	RACM-MADE/VBS	SAPRC99-MOSAIC/VBS
Módulos para evaluación de aerosoles secundarios	No disponible	VBS para evolución de aerosoles orgánicos	VBS para evolución de aerosoles orgánicos

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Emisiones incluidas en los análisis de sensibilidad

Es importante destacar que los análisis de sensibilidad fueron llevados a cabo previo a la consolidación final de todos los inventarios de emisiones para el área de influencia, razón por la cual para dichas simulaciones se incluyeron solo algunas de las fuentes más representativas que se encontraban finalizadas o en un estado avanzado de estimación.

En lo que respecta a emisiones de origen antropogénico se incluyeron emisiones industriales (Palmira, Yumbo, Cali y regionales), móviles (Palmira, Yumbo y Cali), pecuarias, resuspensión agrícola, producción de carbón vegetal, quemas abiertas precosecha e incendios. Estas emisiones fueron previamente desagregadas espacial y temporalmente, como se describió en el capítulo 2, además, se realizó una especiación química siguiendo los requerimientos específicos de los tres mecanismos químicos a testear.

De otro lado, las emisiones biogénicas fueron estimadas en línea utilizando un modelo global denominado Modelo de Emisión de Gases y Aerosoles de la Naturaleza (MEGAN por sus siglas en inglés (Guenther et al., 2012)).

Se realizaron tres simulaciones de una semana comprendida entre el 30 de julio al 06 de agosto de 2018, cada una con un mecanismo químico específico. Se limitaron las simulaciones a este periodo únicamente debido al alto costo computacional que tiene ejecutar el modelo WRF-Chem con el componente químico activado. Como ejemplo de esto, se resume en la Tabla 17 el tiempo computacional requerido para simular 7 días con los tres mecanismos químicos testeados.

Tabla 17. Tiempo computacional requerido para la simulación con los mecanismos químicos a evaluar en el análisis de sensibilidad

Mecanismo Químico	Tiempo computacional para simular una semana (7 días)
CBMZ - MOSAIC	44 horas
RACM - MADE/VBS	32 horas
SAPRC99 - MOSAIC/VBS	58 horas

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Datos observados y evaluación de resultados del modelo

Para evaluar los resultados del análisis de sensibilidad propuesto, se realizó un análisis de las concentraciones obtenidas en la simulación para los contaminantes PM₁₀, PM_{2.5} y O₃, resultados que fueron contrastados contra medidas realizadas en superficie por distintas estaciones de calidad del aire que cubren los municipios de Yumbo, Palmira y sus áreas de

influencia. La información de mediciones en superficie se extrajo de la base de datos de calidad de aire con datos filtrados y depurados que fue descrita en el capítulo 1. Los detalles de las estaciones específicas empleadas para la evaluación y su ubicación se muestran en la Tabla 18 y Figura 45.

Las comparaciones entre modelo y observación se realizaron mediante dos aproximaciones. En primer lugar, a través de análisis cualitativo analizando para este fin los perfiles horarios extraídos del modelo y los perfiles horarios promedio para el año 2018 de las estaciones que contaban con dicha información, esto teniendo en cuenta que no todas las estaciones permiten el análisis de registros horarios para el periodo específico simulado, además, teniendo en cuenta que la distribución de emisiones da cuenta de un comportamiento para un día laboral típico y en algunos casos variaciones generales los fines de semana, siendo entonces coherente evaluar los resultados obtenidos cualitativamente en función de perfiles horarios observados durante el año asociados con el ejercicio de simulación.

Tabla 18. Estaciones de calidad del aire en el área de influencia que fueron empleadas para el análisis y evaluación de las simulaciones realizadas

Estación	Abreviación*	Norte [Colombia Oeste]	Este [Colombia Oeste]	Altitud [m]	Contaminante
BASE AEREA MARCO FIDEL SUAREZ	BAS-A	873770.5	1064203.8	960	PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂
CANAVERALEJO	CAN-A	868389.1	1059854.9	967	PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂
COMPARTIR	COM-A	870885.3	1067875.2	952	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃
ERMITA	ERM-A	873875.7	1060729.0	994	PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂
PANCE	PAN-A	857273.7	1060561.7	960	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA	MPAL-A	880212.6	1085624.7	999	CO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , SO ₂
UNIVERSIDAD DEL VALLE	UVA-A	865308.7	1060411.9	978	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , NO ₂ , UV-PM, BC.
FLORA	FLO-A	877751.6	1061812.0	965	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂
ERA	ERA-A	873317.8	1061698.8	978	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂
TRANSITORIA	TRA-A	869646.4	1064760.4	954	PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂
CASCAJAL	CAS-M	858569.6	1061696.7	990	PM ₁₀
DOLORES	DOL-M	878600.5	1066040.5	951	PM ₁₀ , PM _{2.5}
ECA YUMBO	YUM-A	887547.2	1065324.6	989	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂
ECA YUMBO	YUM-M	887547.2	1065324.6	989	PM ₁₀ , PM _{2.5}
TULUA	TUL-A	941357.2	1097932.0	998	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂
BUGA	BUG-M	922367.4	1085600.7	969	PM ₁₀

Estación	Abreviación*	Norte [Colombia Oeste]	Este [Colombia Oeste]	Altitud [m]	Contaminante
PALMIRA	PAL-A	882821.5	1086424.1	1012	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, NO, NO ₂ , O ₃
PALMIRA	PAL-M	882821.5	1086424.1	1012	PM ₁₀ , PM _{2.5}
CANDELARIA	CAND-A	868407.5	1080945.9	979	PM ₁₀ , PM _{2.5}
ACOPI	ACO-A	878386.9	1063395.4	956	PM ₁₀ , PM _{2.5}
AMERICAS	AME-M	887671.8	1065519.9	983	PM ₁₀
JAMUNDI	JAM-A	852491.7	1059606.3	974	PM ₁₀ , PM _{2.5}

* -A: Estación automática, -M: Estación manual

Fuente: Elaboración propia.

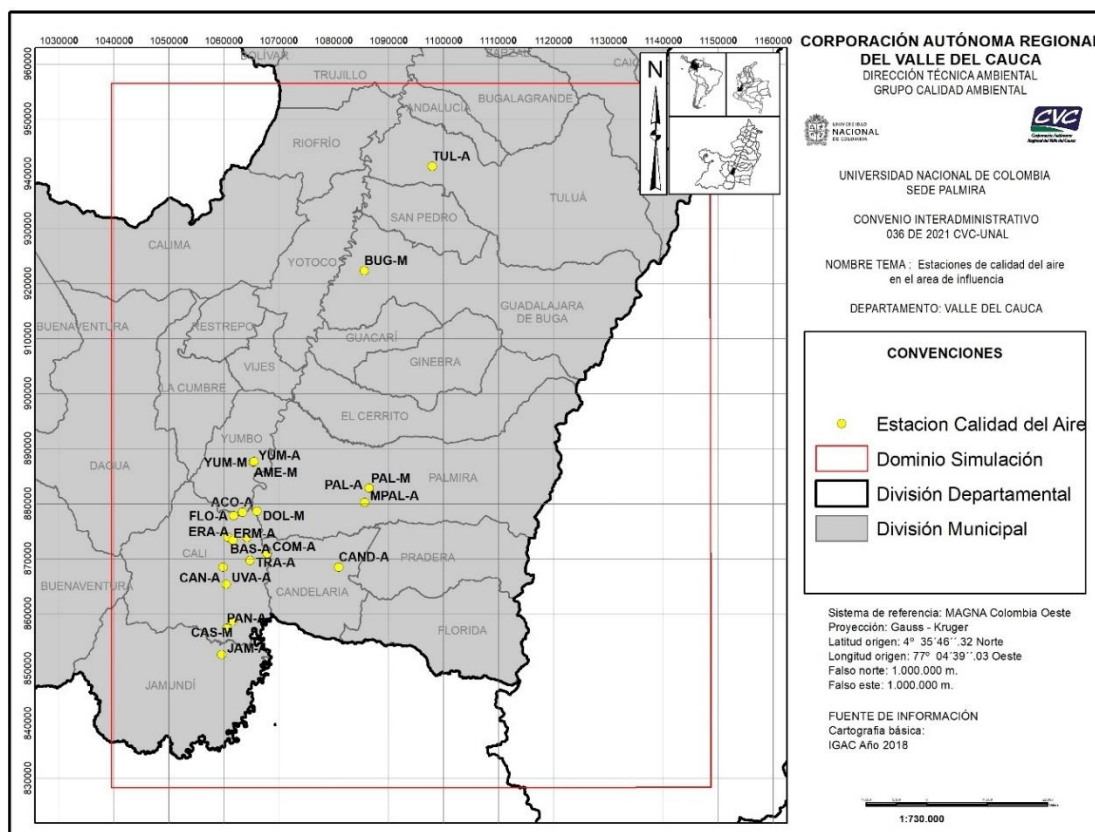


Figura 45. Ubicación de estaciones de calidad del aire utilizadas como puntos de análisis para evaluar los resultados de la simulación de calidad del aire

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se realizó una validación cuantitativa del modelo, estimando diferentes estadísticos de desempeño. Es importante remarcar que estos estadísticos de desempeño se computaron al comparar perfiles horarios del año 2018 para aquellas estaciones de calidad del aire que disponían de dicha información, con los perfiles horarios de la semana empleada para simulación. Nuevamente, se acoge esta aproximación ante la falta de datos

medidos en varias estaciones para las fechas específicas simuladas y las consideraciones expuestas sobre la estimación de los inventarios de emisión en el área de influencia. Los estadísticos empleados fueron:

- **Sesgo promedio (Mean Bias, MB):** Cuantifica la desviación del modelo o errores sistemáticos indicando si este tiende a sobreestimar ($MB > 0$) o subestimar ($MB < 0$) teniendo como base los valores observados.
- **Error absoluto promedio (Mean Gross Error, MGE):** Medida que cuantifica a través del valor absoluto la tendencia del modelo a subestimar o sobreestimar.
- **Sesgo promedio normalizado (Normalized Mean Bias, NMB):** El NMB brinda información sobre la tendencia del modelo a subestimar o sobreestimar en una escala normalizada, lo cual permite que los valores sean comparables con series de datos que tienen escalas diferentes.
- **Error absoluto promedio normalizado (Normalized Mean Gross Error, NMGE):** Al igual que el MGE es una medida que cuantifica los errores del modelo que no son aleatorios o sistemáticos, sin embargo, lo hace en una escala normalizada que hace los valores comparables con otras series de datos.
- **Raíz del error cuadrático medio (Root Mean Squared Error, RMSE):** Es una medida de que tan distanciadas están las predicciones de los valores reales, empleando una distancia euclidiana.
- **Coefficiente de correlación de Pearson (r):** Indica si existe o no una relación lineal entre los valores modelados y los valores observados. Un valor de 1 indica una relación directa perfecta, un valor de -1 indica una relación indirecta perfecta y un valor de cero indica que no existe una relación lineal entre variables.

3.2.4. Resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad para selección del mecanismo químico y esquema de aerosoles

3.2.4.1. *Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de material particulado, PM_{10}*

Los tres mecanismos químicos empleados en los análisis de sensibilidad sugieren subestimaciones del PM_{10} con excepción de resultados comparativos con las estaciones MPAL y TRA, como se puede evidenciar en la Figura 46, donde se observan los perfiles horarios obtenidos para todo el periodo simulado utilizando los tres mecanismos de análisis. Es importante destacar que para este tipo de contaminante los modelos eulerianos como WRF-Chem suelen subestimar las concentraciones con respecto a los registros medidos en superficie, esto teniendo en cuenta que los valores del modelo representan una concentración promedio para una celda o caja, en este caso de 1 km x 1 km en superficie y cerca de 60 metros de altura, mientras que las estaciones en superficie pueden estar afectadas por fenómenos de menor escala según su nivel de exposición a fuentes locales de contaminación y la configuración misma del equipo e monitoreo, en términos por ejemplo, de su altura sobre el nivel del suelo, posibles obstrucciones cercanas que generen estancamiento de contaminantes a nivel de microescala, entre otros.

Contrastando las predicciones entre los mecanismos, el perfil horario general para las diferentes estaciones es similar con todos ellos. Sin embargo, se destaca que el mecanismo RACM – MADE/VBS predice concentraciones ligeramente más elevadas de PM₁₀ que los otros dos mecanismos testeados, lo cual ayuda a reducir la subestimación en la mayoría de las estaciones. De hecho, se puede constatar en los estadísticos de desempeño compilados y presentados en la Tabla 19, que en promedio RACM – MADE/VBS presenta los valores más bajos de NMB (0.49) NMGE (0.55) y RMSE (30.54), y la mayor correlación (0.34).

Una posible explicación del porque las concentraciones son más elevadas con RACM – MADE/VBS, es que la representación modal de MADE permite incluir las emisiones de PM₁₀ como una especie agregada y posteriormente se añade información sobre la composición química del material particulado. Por el contrario, la representación por bins de MOSAIC en los dos mecanismos restantes solo permite la inclusión de especies químicas principales que componen el PM₁₀ (por ejemplo, carbono elemental, nitratos, sulfatos, materia orgánica, sodio, cloro y amoníaco), lo que puede generar una subestimación en la representación de la masa total del PM a partir de los valores de emisión que se incluyen el modelo de simulación. Sumado a lo anterior, RACM – MADE/VBS representa una formación mayor de material particulado secundario en comparación con los demás mecanismos de análisis.

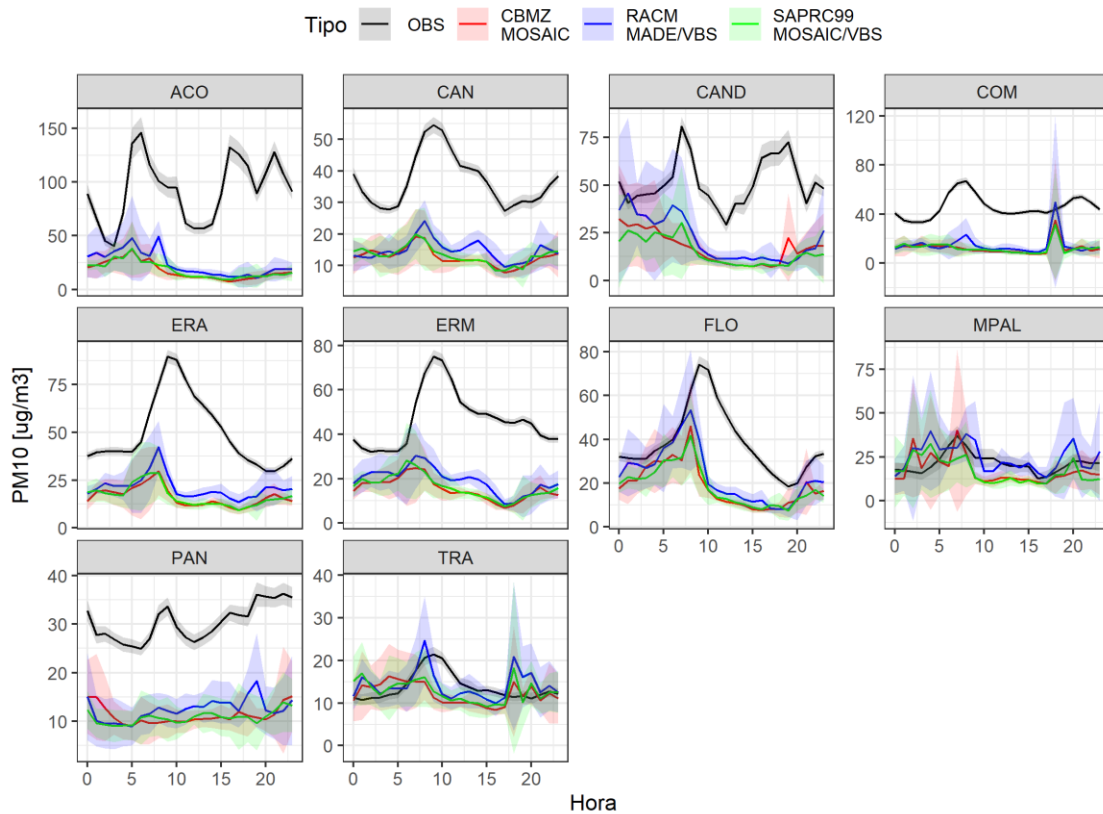


Figura 46. Perfiles horarios de PM₁₀ observados y simulados con diferentes mecanismos químicos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Estadísticos de desempeño para la predicción de PM_{10} durante los análisis de sensibilidad

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
PM₁₀ - CBMZ						
ACO	-75.15	75.15	-0.81	0.81	81.16	-0.01
CAN	-24.29	24.29	-0.66	0.66	25.45	0.37
CAND	-34.55	34.55	-0.67	0.67	37.55	0.00
COM	-33.56	33.56	-0.73	0.73	35.23	-0.06
ERA	-33.71	33.71	-0.67	0.67	38.25	0.13
ERM	-31.37	31.37	-0.67	0.67	34.19	-0.02
FLO	-19.89	19.89	-0.52	0.52	24.70	0.36
JAM	-50.64	50.64	-0.83	0.83	55.69	0.41
MPAL	-4.14	6.92	-0.19	0.32	8.04	0.51
PAN	-19.17	19.17	-0.63	0.63	19.47	0.40
TRA	-1.63	3.59	-0.12	0.26	4.45	-0.07
PROMEDIO	-29.83	30.26	-0.59	0.62	33.11	0.18
PM₁₀ - RACM						
ACO	-68.79	68.79	-0.74	0.74	75.66	0.01
CAN	-22.22	22.22	-0.60	0.60	23.07	0.73
CAND	-30.01	30.41	-0.58	0.59	34.35	0.02
COM	-31.19	31.68	-0.68	0.69	33.15	0.12
ERA	-28.95	28.95	-0.58	0.58	33.68	0.30
ERM	-27.38	27.38	-0.59	0.59	30.17	0.21
FLO	-15.61	15.61	-0.40	0.40	20.89	0.49
JAM	-50.12	50.12	-0.82	0.82	54.96	0.57
MPAL	3.11	5.98	0.15	0.28	7.88	0.45
PAN	-17.94	17.94	-0.59	0.59	18.20	0.56
TRA	0.34	2.87	0.02	0.21	3.90	0.29
PROMEDIO	-26.25	27.45	-0.49	0.55	30.54	0.34
PM₁₀ - SAPRC99						
ACO	-74.63	74.63	-0.81	0.81	80.52	0.03
CAN	-23.75	23.75	-0.64	0.64	24.87	0.44
CAND	-36.34	36.34	-0.71	0.71	38.81	0.10
COM	-33.38	33.38	-0.73	0.73	35.00	-0.09
ERA	-33.33	33.33	-0.67	0.67	37.99	0.11
ERM	-30.51	30.51	-0.65	0.65	33.58	-0.07
FLO	-20.20	20.20	-0.52	0.52	24.30	0.46
JAM	-51.03	51.03	-0.83	0.83	56.02	0.41
MPAL	-4.48	7.67	-0.21	0.36	8.90	0.25
PAN	-19.61	19.61	-0.65	0.65	19.87	0.55
TRA	-1.04	3.38	-0.08	0.24	4.19	0.00

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
PROMEDIO	-29.84	30.35	-0.59	0.62	33.10	0.20

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.2. Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de material particulado, $PM_{2.5}$

En la Figura 47 se presentan los perfiles horarios simulados de $PM_{2.5}$ y su comparación con observaciones de distintas estaciones de análisis. Se puede observar que los resultados obtenidos con el modelo tienden a la subestimación en todas las estaciones de validación sin importar el mecanismo químico empleado, similar a lo sucedido con el PM_{10} ; sin embargo, los sesgos para este contaminante son sustancialmente inferiores en relación con los resultados obtenidos para PM_{10} . Nuevamente para esta fracción de material particulado, el mecanismo RACM – MADE/VBS es el que permite una reducción de las subestimaciones tal como lo sugieren los estadísticos de desempeño (Ver Tabla 20). Por ejemplo, el valor de NMB promedio con este mecanismo es de -0.27, comparado con valores de -0.35 con SAPRC99 – MOSAIC/VBS y -0.42 con CBMZ – MOSAIC.

Tabla 20. Estadísticos de desempeño para la predicción de $PM_{2.5}$ durante los análisis de sensibilidad

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
PM_{2.5} - CBMZ						
ACO	-7.90	10.15	-0.36	0.46	11.18	0.03
BAS	-9.60	9.64	-0.49	0.49	10.86	0.22
CAND	-3.77	9.39	-0.23	0.57	10.79	-0.54
COM	-2.84	5.03	-0.23	0.41	6.10	-0.17
JAM	-12.16	12.16	-0.60	0.60	14.68	0.34
UVA	-15.33	15.33	-0.62	0.62	15.61	0.13
PROMEDIO	-8.60	10.28	-0.42	0.52	11.54	0.00
PM_{2.5} - RACM						
ACO	-4.32	8.50	-0.20	0.39	9.41	0.12
BAS	-6.71	6.85	-0.34	0.35	8.15	0.35
CAND	-0.63	8.93	-0.04	0.54	10.72	-0.52
COM	0.06	3.25	0.00	0.26	5.11	0.07
JAM	-10.25	10.25	-0.50	0.50	13.07	0.30
UVA	-13.18	13.18	-0.53	0.53	13.34	0.60
PROMEDIO	-5.84	8.49	-0.27	0.43	9.97	0.15
PM_{2.5} - SAPRC						
ACO	-5.61	9.22	-0.26	0.42	10.34	0.06
BAS	-7.86	8.19	-0.40	0.41	9.51	0.20
CAND	-2.90	9.79	-0.18	0.59	11.16	-0.42
COM	-1.51	4.78	-0.12	0.39	5.93	-0.17
JAM	-11.80	11.80	-0.58	0.58	14.42	0.24

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
UVA	-14.17	14.17	-0.57	0.57	14.47	0.18
PROMEDIO	-7.31	9.66	-0.35	0.49	10.97	0.01

Fuente: Elaboración propia.

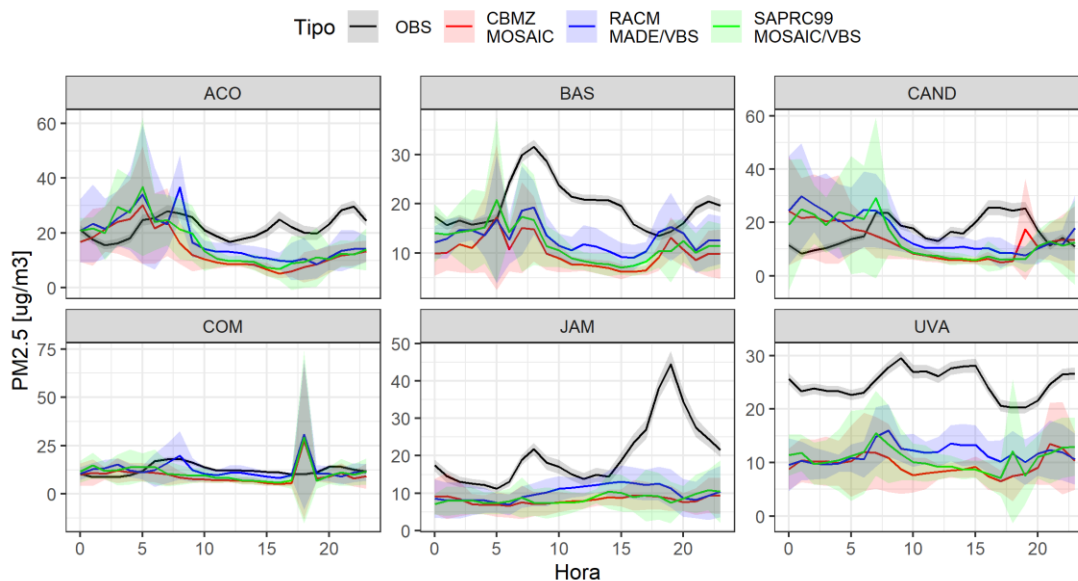


Figura 47. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados con diferentes mecanismos químicos

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.3. Evaluación de resultados obtenidos para concentraciones de ozono troposférico O_3

Dentro del análisis de sensibilidad se incluyó el estudio de los resultados simulados para el ozono troposférico (O_3), contaminante secundario caracterizado por ser un trazador relativamente estable en cuanto a los perfiles diurnos horarios y tenido en cuenta comúnmente en los análisis de simulación atmosférica. En la Figura 48 se muestran los resultados de simulación de O_3 en los ejercicios de sensibilidad, los resultados muestran que los tres mecanismos químicos empleados capturan con un buen grado de ajuste el perfil horario observado de este contaminante. Sin embargo, y contrario a lo sucedido con el material particulado, el modelo tiende a sobreestimar la concentración de O_3 , en particular durante las horas con presencia de radiación solar. Estos resultados permiten plantear varias hipótesis que explican la sobreestimación obtenida. Por ejemplo, problemas en la representación de la cobertura nubosa, tal como se describió en la simulación meteorológica del periodo 1 de simulación (ver informe de vigencia 2021), comportamiento puede desencadenar mayor producción de O_3 por reacciones fotoquímicas de sus precursores principales (NO_x y VOC). En relación con este comportamiento, una posible sobreestimación de la emisión de precursores de O_3 puede también inferir en una mayor producción de este contaminante en periodos de mayor radiación solar.

Analizando los estadísticos de desempeño, resumidos en la Tabla 21, los resultados obtenidos para mecanismos como CBMZ-MOSAIC y RACM-MADE/VBS fueron similares, y en ambos casos mejores en comparación con SAPRC99-MOSAIC/VBS (valores de NMB: 0.52 vs 0.60, NMGE 0.67 vs 0.72, RMSE 16.51 vs 18.03). Las diferencias en la predicción de O₃ entre mecanismos están relacionadas con la forma en que cada uno de ellos representa la química de los VOC, el cual es uno de los principales precursores en la formación de O₃.

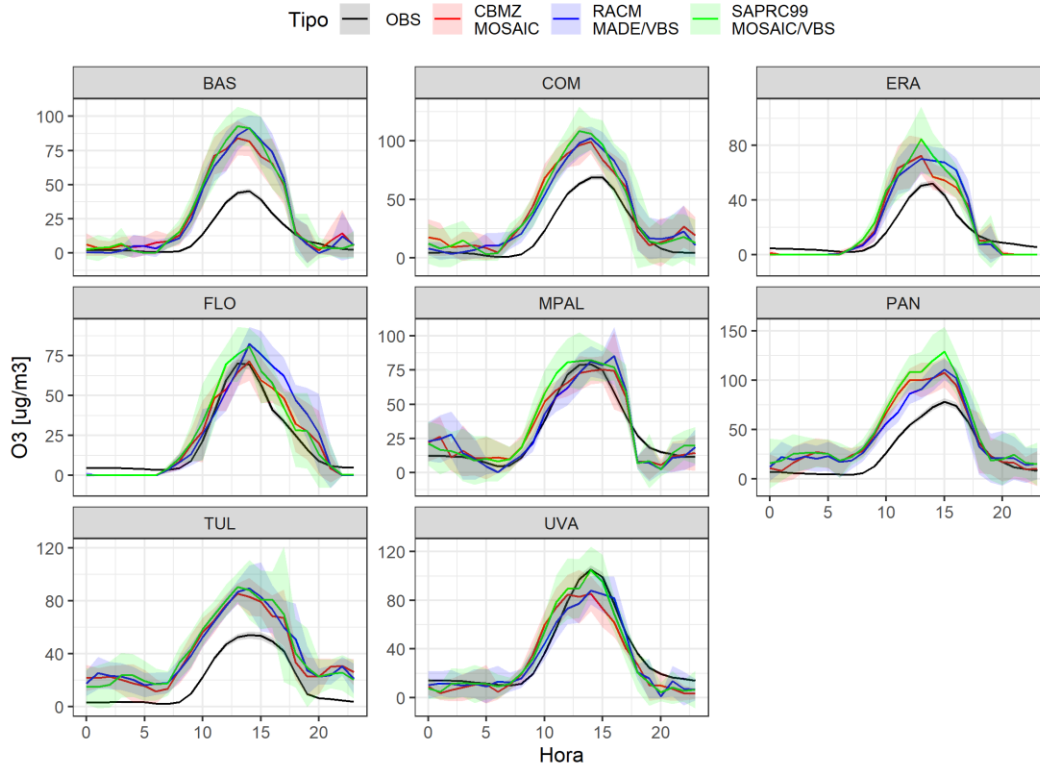


Figura 48. Perfiles horarios de O₃ observados y simulados con diferentes mecanismos químicos

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Estadísticos de desempeño para la predicción de O₃ durante los análisis de sensibilidad

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
O₃ - CBMZ						
BAS	15.67	16.24	1.20	1.24	22.40	0.95
COM	16.91	17.53	0.78	0.81	21.52	0.93
ERA	5.15	9.63	0.33	0.62	13.26	0.93
FLO	1.60	6.01	0.08	0.28	7.03	0.96
MPAL	2.38	7.25	0.08	0.25	8.93	0.94
PAN	17.65	17.69	0.66	0.66	22.96	0.93
TUL	21.34	21.34	1.13	1.13	22.61	0.97

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
UVA	-4.95	10.82	-0.14	0.30	12.63	0.93
PROMEDIO	9.47	13.32	0.52	0.66	16.42	0.94
O₃ - RACM						
BAS	15.09	16.36	1.16	1.25	23.75	0.97
COM	15.42	15.51	0.71	0.72	19.50	0.97
ERA	5.72	10.90	0.37	0.70	14.29	0.95
FLO	4.53	8.91	0.21	0.42	12.33	0.92
MPAL	1.59	7.42	0.05	0.25	10.24	0.93
PAN	16.39	16.84	0.61	0.63	19.58	0.96
TUL	22.44	22.44	1.19	1.19	23.33	0.98
UVA	-4.10	7.16	-0.11	0.20	9.09	0.97
PROMEDIO	9.63	13.19	0.52	0.67	16.51	0.96
O₃ - SAPRC99						
BAS	15.96	16.44	1.22	1.26	24.64	0.97
COM	16.95	16.95	0.78	0.78	22.14	0.96
ERA	6.90	11.89	0.44	0.76	15.72	0.95
FLO	3.36	6.70	0.16	0.32	7.77	0.98
MPAL	4.90	8.59	0.17	0.29	10.61	0.95
PAN	23.54	23.91	0.88	0.89	28.89	0.94
TUL	23.18	23.18	1.23	1.23	24.66	0.98
UVA	-1.99	7.98	-0.06	0.22	9.82	0.96
PROMEDIO	11.60	14.46	0.60	0.72	18.03	0.96

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Selección final del mecanismo óptimo para las simulaciones de calidad del aire

A partir de los resultados obtenidos durante los análisis de sensibilidad, se seleccionó el mecanismo químico RACM-MADE/VBS para la realización de las simulaciones base. Este mecanismo permitió la representación más precisa de los tres contaminantes evaluados (PM₁₀, PM_{2.5} y O₃). Asimismo, se destaca que este mecanismo es más eficiente computacionalmente, pues para una simulación de una semana toma 32 horas de tiempo computacional, comparado con 44 horas para CBMZ-MOSAIC y 58 horas para SAPRC99-MOSAIC/VBS.

3.3. SIMULACIONES BASE CON LA TOTALIDAD DE EMISIONES PARA LOS PERIODOS DE INTERÉS

Una vez definido mecanismo químico óptimo, se dio paso a la realización de las simulaciones base, en las cuales se incluyeron en el modelo la totalidad de emisiones estimadas en el área de influencia para la simulación. Se realizaron dos simulaciones de 4

semanas (28 días) para dos periodos diferentes del año 2018. El periodo 1 incluyó las fechas comprendidas entre el 30 de julio al 27 de agosto, periodo caracterizado por predominio de tiempo seco. El periodo 2 evaluado incluyó las fechas del 2 al 30 de abril, para las cuales se presentaron mayores eventos de precipitación. La selección de estos periodos permitió estudiar el comportamiento del modelo en épocas distintas del año y analizar el estado de calidad del aire en el área de simulación bajo regímenes meteorológicos diversos.

Los resultados de estas simulaciones se tomaron como base para analizar los fenómenos de transporte de contaminantes al interior del VRC, evaluar las zonas críticas con mayor concentración de material particulado y fueron empleados como la línea base de comparación para los análisis de contribución de fuentes que se describen en la sección final de este capítulo.

Es importante recordar que se tomaron en consideración un total de 18 fuentes de emisión en el área de influencia: (1) Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón. (2) Almacenamiento de combustible. (3) Asaderos. (4) Canteras. (5) Combustión por fuentes móviles en ruta. (6) Estaciones de servicio de combustible. (7) Fertilización agrícola. (8) Gas natural residencial. (9) Ladrilleras. (10) Uso de maquinaria en cañicultura. (11) Panaderías. (12) Actividades pecuarias. (13) Producción artesanal de carbón vegetal. (14) Quemadas abiertas en precosecha e incendios. (15) Rellenos sanitarios. (16) Resuspensión por actividades agrícolas. (17) Resuspensión en vías. (18) Sector industrial.

Todas estas emisiones fueron desagregadas espaciotemporalmente tal como se describió en el capítulo 2, e incluidas en el modelo usando el preprocesador de emisiones PyChEmiss (disponible en <https://github.com/quishqa/PyChEmiss>).

3.3.1.1. Evaluación del modelo y análisis de resultados

Los resultados de la simulación base fueron evaluados siguiendo el mismo protocolo descrito previamente en los análisis de sensibilidad, en el cual se analizaron de forma cualitativa y cuantitativa los perfiles de concentración horaria obtenidos, a partir de su comparación con algunos resultados disponibles de concentración en aire ambiente de material particulado medidos en estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Adicionalmente, se utilizaron los resultados del modelo para estudiar la dispersión y transporte de contaminantes en el área de estudio. Para este fin, y con ayuda de comandos NCO y el software de programación Python, se generaron mapas de concentración promedio horario junto con los vectores de viento en toda el área de simulación.

De otro lado, se generaron mapas de concentración promedio de material particulado para todo el periodo de la simulación, los cuales permiten identificar zonas de mayor o menor concentración, así como evaluar si alguna zona del área simulación presenta, por ejemplo, posibles excedencias en relación con los límites normativos de concentración máxima promedio anual establecidos en la resolución 2254 de 2017.

3.3.2. Resultados obtenidos en las simulaciones base para concentraciones de material particulado

3.3.2.1. *Análisis de perfiles horarios simulados de PM₁₀*

Tras la inclusión de todos los inventarios de emisión, y la ejecución de las simulaciones para los periodos base de interés, se obtuvo un comportamiento general de simulación caracterizado por subestimación de los perfiles horarios de PM₁₀, resultado que es sugerido teniendo como base comparativa los perfiles medidos en el 2018 en distintas estaciones de calidad del aire, salvo en las estaciones MPAL y TRA. A partir de los análisis cuantitativos con estadísticos de desempeño, se obtuvo en promedio un valor de NMB cercano a -0.52 y -0.40 para los periodos 1 y 2 de simulación respectivamente. Como se indicó previamente, en este tipo de modelos es común que se presente un efecto de “dilución” de las concentraciones, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos se dan en promedio para cada una de las celdas del modelo, siendo el caso concreto de la simulación en el dominio de interés sobre el VRC, una concentración promedio para un área de 1 km x 1 km en un volumen asociado a una altura cercana a los 60 m en el primer nivel de superficie. Los resultados obtenidos en cada celda de simulación se comparan de forma numérica con reportes de estaciones en superficie que pueden representar la calidad del aire en una escala más reducida, que incluso puede verse impactada por fenómenos locales de emisión y exposición directa de la estación, los cuales son altamente complejos, o casi imposibles de representar, en un ejercicio de simulación regional como el realizado en el VRC.

Se destaca como las estaciones MPAL (ubicada en Palmira) y TRA (zona sur de Cali) tienen una buena representación del modelo, como lo muestran los bajos valores de NMB y NMGE (Ver Tabla 22). Asimismo, en la mayoría de las estaciones las simulaciones tienden a representar el comportamiento diurno de los perfiles horarios del PM₁₀, como se puede observar por ejemplo en los resultados de puntos de comparación asociados a estaciones ubicadas en la zona norte de Cali, tales como FLO, ERA y ERM, para las cuales el modelo tiende a representar los máximos de concentración principalmente en horas de la mañana.

El análisis de los perfiles horarios simulados de concentración del PM₁₀ (Figura 49 y Figura 50), así como los estadísticos de desempeño (Tabla 22) estimados por estación, sugiere que los mayores sesgos entre los datos simulados y observaciones se presentaron en la estación ACO (ubicada al sur de Yumbo en la zona industrial de Acopi). En general las concentraciones simuladas son mucho más bajas, resultado que puede estar relacionado con fenómenos de exposición directa de emisiones en el lugar donde estuvo ubicada la estación para el año de simulación. Las visitas de campo y reportes de los funcionarios que operan la estación sugieren la influencia de fenómenos de contaminación locales y exposición directa a emisiones producto, por ejemplo, de zonas de parqueo no pavimentadas y resuspensión de material particulado en vías circundantes en muy mal estado. Este tipo de fenómenos locales a una escala tan reducida no son capturados en la simulación y explican las diferencias obtenidas para esta fracción del material particulado.

Tabla 22. Estadísticos de desempeño para el contaminante PM_{10} obtenidos en los periodos base de simulación

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Periodo 1						
ACO	-72.47	72.47	-0.78	0.78	78.68	-0.09
CAN	-22.18	22.18	-0.60	0.60	23.22	0.54
CAND	-36.39	36.39	-0.71	0.71	38.20	0.34
COM	-32.79	32.79	-0.72	0.72	33.88	0.38
ERA	-30.33	30.33	-0.61	0.61	34.44	0.43
ERM	-29.45	29.45	-0.63	0.63	31.84	0.33
FLO	-16.52	16.52	-0.43	0.43	19.63	0.71
JAM	-47.99	47.99	-0.78	0.78	52.48	0.65
MPAL	0.30	5.12	0.01	0.24	7.65	0.69
PAN	-16.88	16.88	-0.56	0.56	17.15	0.73
TRA	0.96	3.40	0.07	0.25	4.18	0.17
PROMEDIO	-27.61	28.50	-0.52	0.57	31.03	0.44
Periodo 2						
ACO	-66.27	66.27	-0.71	0.71	71.81	0.38
CAN	-19.42	19.42	-0.53	0.53	20.66	0.51
CAND	-25.88	25.88	-0.50	0.50	28.78	0.39
COM	-29.76	29.76	-0.65	0.65	31.00	0.28
ERA	-24.89	25.25	-0.50	0.51	30.73	0.16
ERM	-24.36	24.36	-0.52	0.52	26.58	0.56
FLO	-8.96	13.67	-0.23	0.35	16.85	0.38
JAM	-45.00	45.00	-0.74	0.74	48.85	0.85
MPAL	3.89	6.40	0.18	0.30	8.04	0.55
PAN	-13.71	13.71	-0.45	0.45	14.24	0.68
TRA	3.51	4.53	0.25	0.33	5.48	0.12
PROMEDIO	-22.80	24.93	-0.40	0.51	27.55	0.44

Fuente: Elaboración propia.

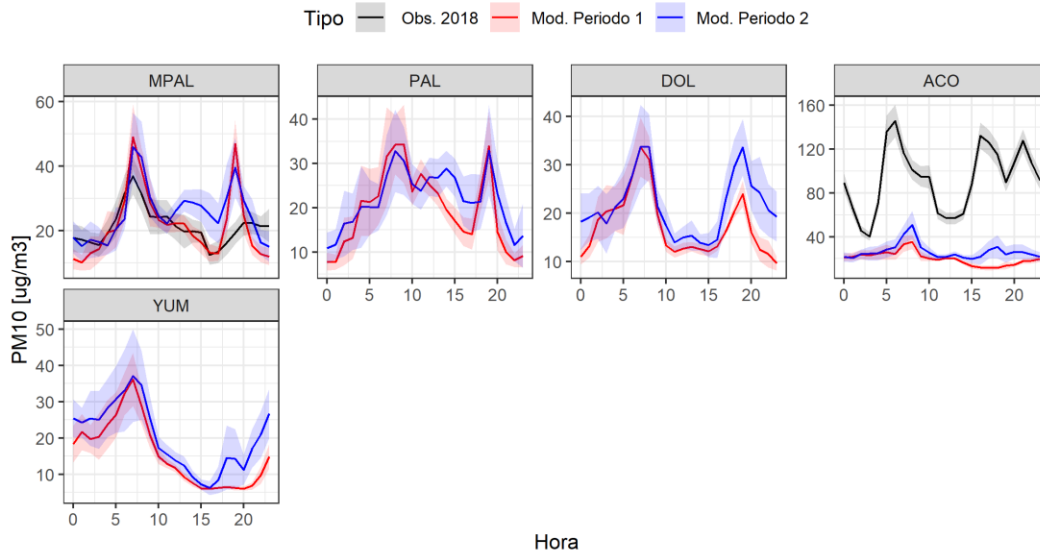


Figura 49. Perfiles horarios de PM_{10} observados y simulados en relación con puntos de monitoreo de los municipios de Palmira y Yumbo
Fuente: Elaboración propia.

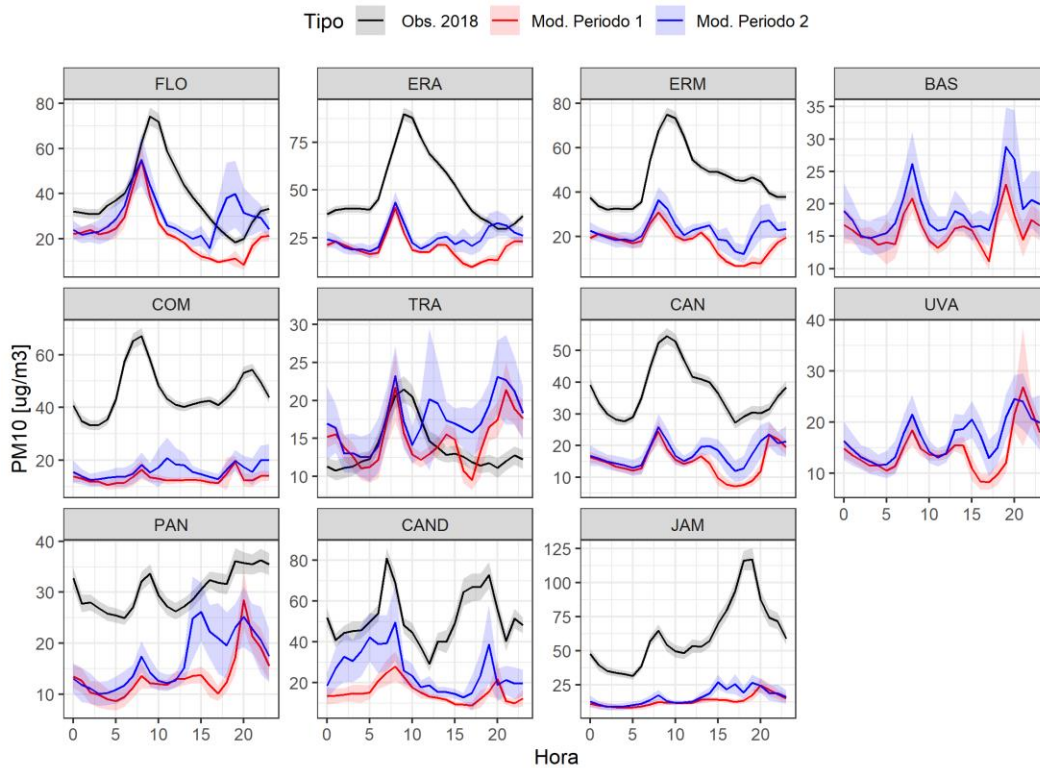


Figura 50. Perfiles horarios de PM_{10} observados y simulados en relación con puntos de monitoreo ubicados en otras regiones del área de influencia para la simulación
Fuente: Elaboración propia.

El análisis del comportamiento del PM_{10} desde los resultados de simulación sugiere, por ejemplo, que los máximos de concentración en regiones asociadas a puntos como la estación YUM (norte de la zona urbana de Yumbo), se dan en horas de la mañana (05:00 – 09:00), causados por las emisiones industriales en periodos de estabilidad atmosférica y asociados con el aumento de las emisiones vehiculares durante las horas pico de tráfico. En la tarde y parte de la noche, las concentraciones disminuyen de manera drástica gracias a la ventilación que proveen los vientos que ingresan del Pacífico colombiano, en un fenómeno conocido como marea del Pacífico.

La región cercana a la estación MPAL, ubicada sobre el centro la cabecera municipal del municipio de Palmira presenta dos picos de concentración durante el día alrededor de las 08:00 y 20:00 hora local, asociados con las horas pico de tráfico vehicular principalmente y, por su ubicación geográfica, una menor influencia de la ventilación que es promovida por la entrada de vientos desde el occidente en la tarde y parte de la noche principalmente. De otra parte, la estación PAL, ubicada al sur de la cabecera municipal de Palmira, presenta un perfil horario un poco más homogéneo donde los picos de concentración de PM_{10} son inferiores a los presentados hacia el centro de la cabecera municipal.

Se destaca además que durante el periodo 2 de simulación, algunos puntos de análisis asociados a estaciones de Yumbo y Cali como ACO, ERM, ERA, FLO, PAN y UVA; evidenciaron picos de concentración durante la tarde y noche, lo que no se apreció durante el periodo 1. Esto puede estar relacionado con episodios de quema cercanos a las zonas de análisis, que no se presentaron durante el periodo 1 de simulación. Este resultado evidencia la complejidad inherente a la simulación de fuentes de emisión como las quemaduras abiertas, cuya aleatoriedad en ocurrencia tanto espacial como temporal, plantea un desafío mayor no solo en la simulación de material particulado, sino también en el estudio del impacto de este tipo de fuentes en la calidad del aire de la región de análisis.

3.3.2.2. Análisis de perfiles horarios simulados de $PM_{2.5}$

A diferencia de los resultados de perfiles horarios simulados para el PM_{10} , las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas para los periodos base de simulación presentaron una subestimación relativamente baja, como lo evidencian los valores promedio del NMB obtenidos para ambos periodos (-0.35 para el periodo 1 y -0.13 para el periodo 2, ver Tabla 23). En particular, las estaciones ACO y COM presentaron un alto grado de ajuste entre la simulación y las observaciones, como lo muestran los perfiles horarios resumidos en la Figura 51 y Figura 52.

En el caso concreto de las mejoras en la representación del material particulado en su fracción $PM_{2.5}$ en la estación ACO, en comparación con los resultados para PM_{10} , toma fuerza la hipótesis de la influencia de fenómenos de exposición directa de contaminación como la resuspensión de material particulado, que es mayoritariamente de tipo grueso dentro de la fracción respirable.

Los resultados de los perfiles horarios de $PM_{2.5}$ simulados en zonas asociadas a las estaciones del municipio de Yumbo (como ACO y YUM), sugieren la ocurrencia de máximos de concentración entre las 05:00 y 09:00 horas, con un posterior descenso de las

concentraciones y nuevamente incrementos que se comienzan a notar a partir de las 21:00 y 22:00 horas. Este comportamiento se asocia con la ventilación causada por los vientos del Pacífico que ingresan desde el occidente y noroccidente, predominantemente entre la depresión topográfica que se da entre el PN Los Farallones y el Cerro Calima, tal como se mencionó previamente.

En el caso del comportamiento del $PM_{2.5}$ en regiones asociadas con las estaciones de la zona urbana de Palmira (PAL y MPAL), se presenta un comportamiento horario dominado por dos picos de concentración al inicio de la mañana e inicio de la noche, asociados por ejemplo con horas de mayor estabilidad atmosférica y emisiones producto de actividad vehicular en horas de máximo tráfico vehicular, así como la constante influencia de emisiones industriales que son de importancia en los municipios de Palmira y Yumbo, tal como se describió en el capítulo 2.

Tabla 23. Estadísticos de desempeño para el contaminante $PM_{2.5}$ obtenidos en los periodos base de simulación

Estación	MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	r
Periodo 1						
ACO	-7.87	8.17	-0.36	0.37	9.65	0.11
BAS	-7.35	7.41	-0.37	0.38	8.56	0.44
CAND	-4.58	5.17	-0.28	0.31	7.60	0.14
COM	-1.36	2.24	-0.11	0.18	2.77	0.43
JAM	-9.07	9.07	-0.45	0.45	11.40	0.65
UVA	-12.96	12.96	-0.52	0.52	13.39	0.35
PROMEDIO	-7.20	7.50	-0.35	0.37	8.90	0.35
Periodo 2						
ACO	-2.79	4.09	-0.13	0.19	5.10	0.52
BAS	-4.52	5.45	-0.23	0.28	6.44	0.36
CAND	2.71	7.10	0.16	0.43	8.92	0.00
COM	1.46	2.65	0.12	0.21	3.17	0.31
JAM	-6.39	6.76	-0.31	0.33	8.69	0.77
UVA	-10.43	10.43	-0.42	0.42	10.97	0.25
PROMEDIO	-3.33	6.08	-0.13	0.31	7.21	0.37

Fuente: Elaboración propia.

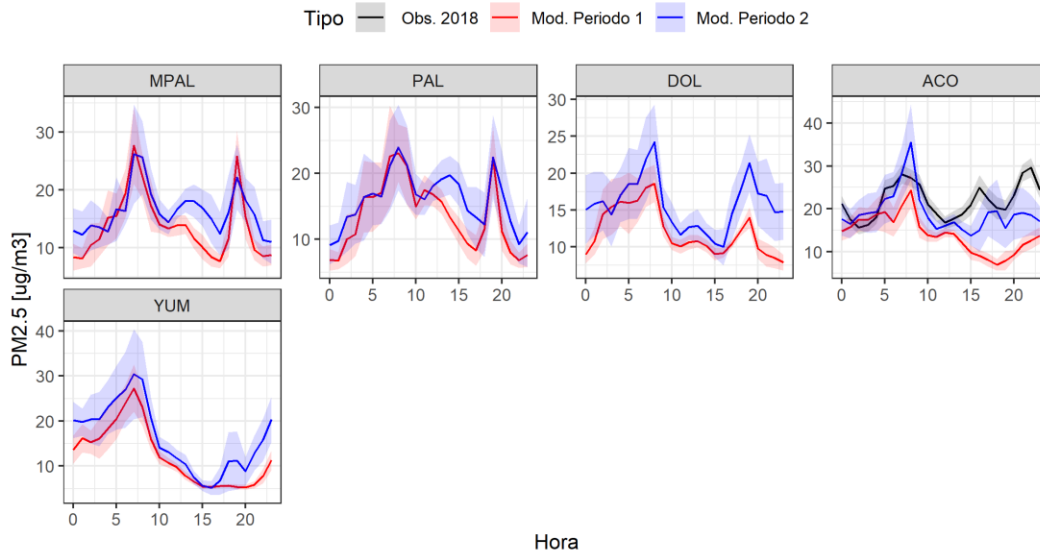


Figura 51. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados en relación con puntos de monitoreo de los municipios de Palmira y Yumbo
Fuente: Elaboración propia.

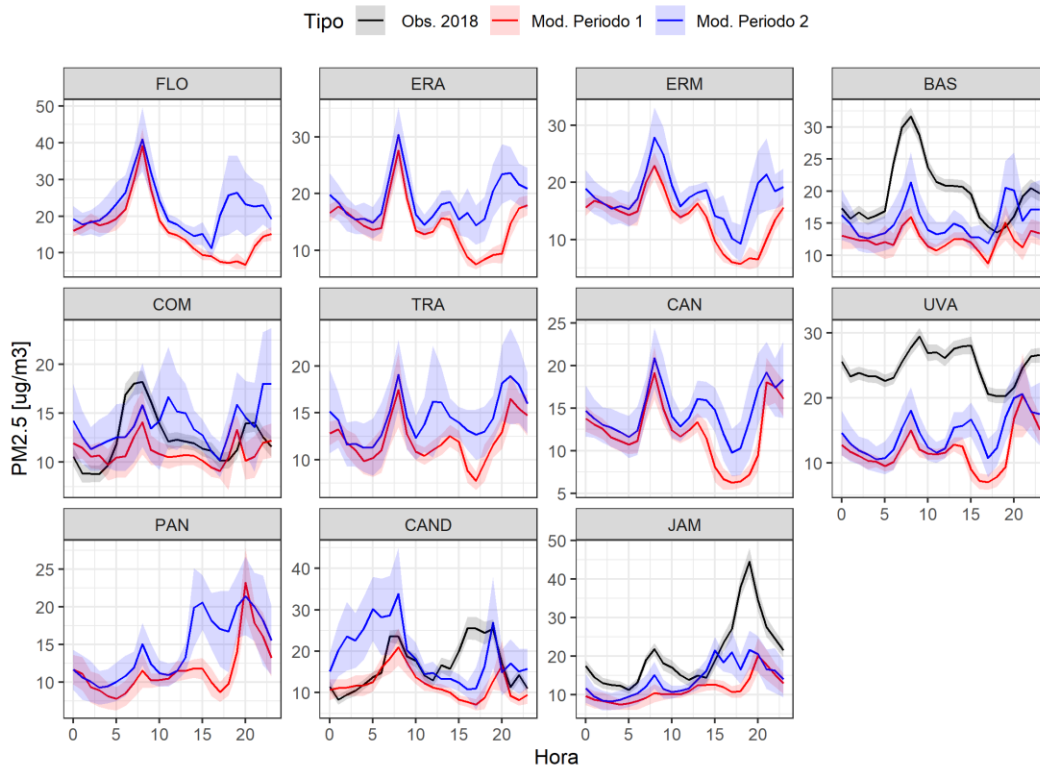


Figura 52. Perfiles horarios de $PM_{2.5}$ observados y simulados en relación con puntos de monitoreo ubicados en otras regiones del área de influencia para la simulación
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3. Mapas de concentración con promedios horarios de material particulado obtenidos en el VRC. Análisis del transporte de contaminantes asociado con el comportamiento de los vientos

A partir de los resultados de simulación obtenidos, se realizaron mapas de concentración promedio horario con el fin de analizar tanto los patrones de transporte del material particulado como las zonas de mayor concentración, asociados con los focos de emisión y los resultados del comportamiento de los vientos en el VRC. En la Figura 53 se presentan los mapas de concentración promedio horario de $PM_{2.5}$ obtenidos en todo el periodo 1 para distintas horas del día en el dominio de interés. A nivel regional, se observan distintas zonas con regiones de mayor concentración, por ejemplo, al norte del dominio de simulación sobre los municipios de Rio Frio, Tuluá y Guadalajara de Buga, concentraciones que tienen relación con quemas abiertas que se presentaron en regiones cercanas durante el periodo simulado. Hacia el sur, sobre el municipio de Candelaria y el norte del departamento del Cauca, también se registran áreas de mayor concentración asociadas con un número importante de episodios de quemas precosecha e incendios, sumado a la influencia de fuentes industriales y vehiculares cercanas.

Enfocándose directamente sobre la región de Palmira y Yumbo, se presentan en las Figura 54 y Figura 55 mapas la concentración promedio horaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} respectivamente para distintas horas del día. Se deja a disposición del lector en el Anexo 14 una animación de los mapas de concentración generados para ambos periodos simulados. Al analizar los resultados obtenidos, se puede determinar que la zona urbana de Palmira está fuertemente influenciada por el transporte de contaminantes, predominantemente de origen industrial, desde la zona norte del municipio, así como focos industriales que se encuentran al norte en límites con el municipio de El Cerrito. Durante la mayor parte del día, los vientos siguen una trayectoria predominante de norte a sur, transportando los contaminantes hacia la cabecera municipal. La mayor concentración de material particulado sobre el área urbana de Palmira se presenta en la mañana, entre las 07:00 y 08:00 horas, comportamiento influenciado no solo por el impacto de las emisiones industriales descritas, sino también por picos de emisión originados dentro del área urbana, producto de actividad de fuentes móviles principalmente; comportamiento influenciado a su vez por una atmósfera más estable y con menor ventilación en relación con horas de mayor turbulencia atmosférica, por ejemplo en periodos de mayor radiación solar que desembocan en un incremento de la altura de la capa de mezcla (ver Figura 56), así como el periodo de la tarde donde se genera una mayor ventilación en el VRC que permite una mayor dispersión de los contaminantes.

En el caso del municipio de Yumbo, las mayores concentraciones de material particulado se presentan al oriente y sur del área urbana, con máximos durante la madrugada y primeras horas de la mañana (aproximadamente hasta las 09:00 hora local). Las mayores concentraciones durante la madrugada se asocian a emisiones por actividad industrial principalmente, que al ser emitidas en un periodo con mayor estabilidad y una baja altura de capa de mezcla (ver Figura 56), difícilmente se dispersan aumentando así las concentraciones en zonas circundantes a los focos de emisión. A primeras horas de la mañana, una combinación de fuentes industriales y móviles principalmente, que tienen origen dentro del mismo municipio de Yumbo, generan condiciones propicias para mantener

áreas de mayor concentración de material particulado en relación con otros periodos del día, en una atmósfera que continúa predominantemente estable. Analizando los patrones de viento que ejercen influencia en el transporte de contaminantes desde y hacia Yumbo, en horas de la tarde e inicios de la noche se incrementa la dispersión del material particulado disminuyendo las concentraciones de éste en el municipio, fenómeno influenciado por vientos que entran al Valle predominantemente desde el noroccidente y occidente del municipio, ventilando la región en sentido noroccidente – suroriente mayoritariamente. Asimismo, los resultados obtenidos sugieren inicialmente que el aporte de los municipios vecinos como Palmira y Cali a la calidad del aire de Yumbo parece no tener una influencia significativa. Por el contrario, los patrones de transporte de contaminantes simulados sugieren que las emisiones de Yumbo pueden influenciar la calidad del aire de municipios cercanos ubicados hacia el oriente y suroriente principalmente. Este ejercicio será abordado con mayor detalle en la sección de análisis de contribución de fuentes que se presenta en la parte final del capítulo 3.

En términos generales, para toda el área de simulación las concentraciones más elevadas se dan durante la madrugada e inicios de la mañana, y en algunas zonas se presentan picos de concentración a inicios de la noche. Una menor ventilación y altura de capa de mezcla, predominantemente en los periodos descritos, favorece la acumulación de contaminantes. Por el contrario, las concentraciones más bajas se dan alrededor del mediodía y en horas de la tarde, periodos donde una mayor turbulencia y altura de la capa de mezcla (ver Figura 56) facilitan la dispersión de los contaminantes; comportamiento que se suma al incremento de la ventilación en el VRC en horas de la tarde, influenciado vientos provenientes del Pacífico que modulan la dispersión de los contaminantes entre las 14 y 21 horas.

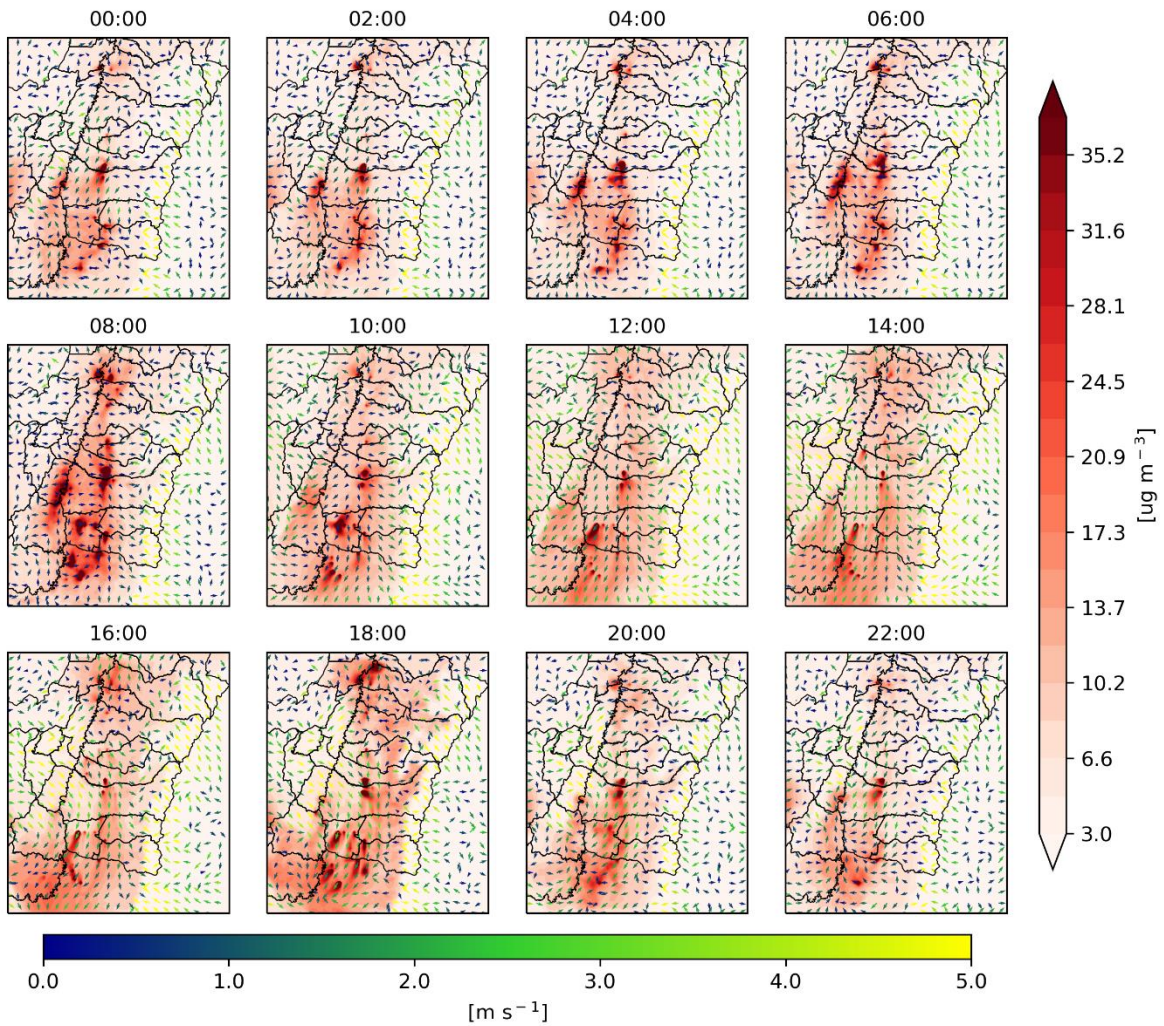


Figura 53. Mapas de concentración promedio horaria de $PM_{2.5}$ y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución
Fuente: Elaboración propia.

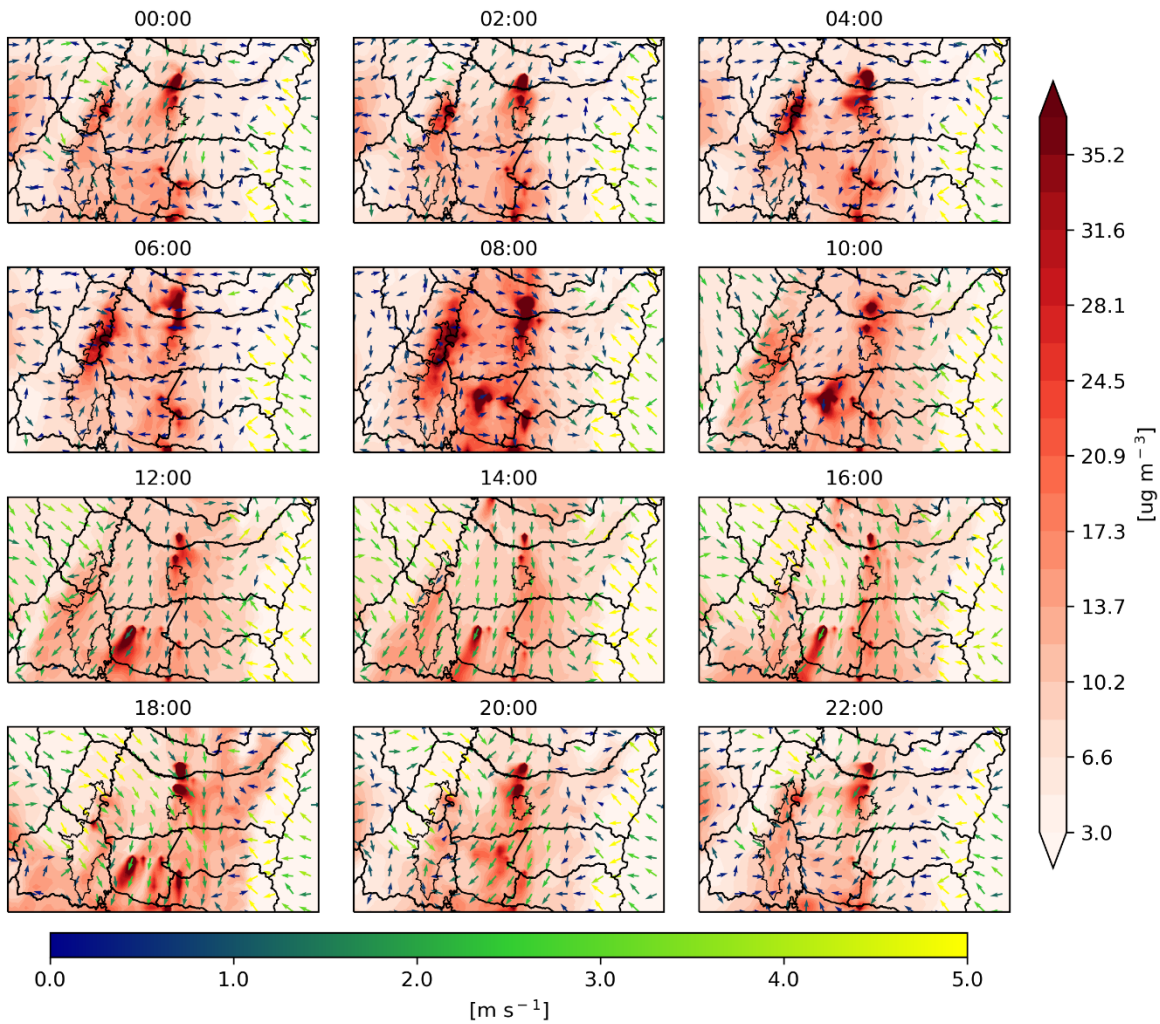


Figura 54. Mapas de concentración promedio horaria de $PM_{2.5}$ y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución. Acercamiento sobre Yumbo y Palmira
 Fuente: Elaboración propia.

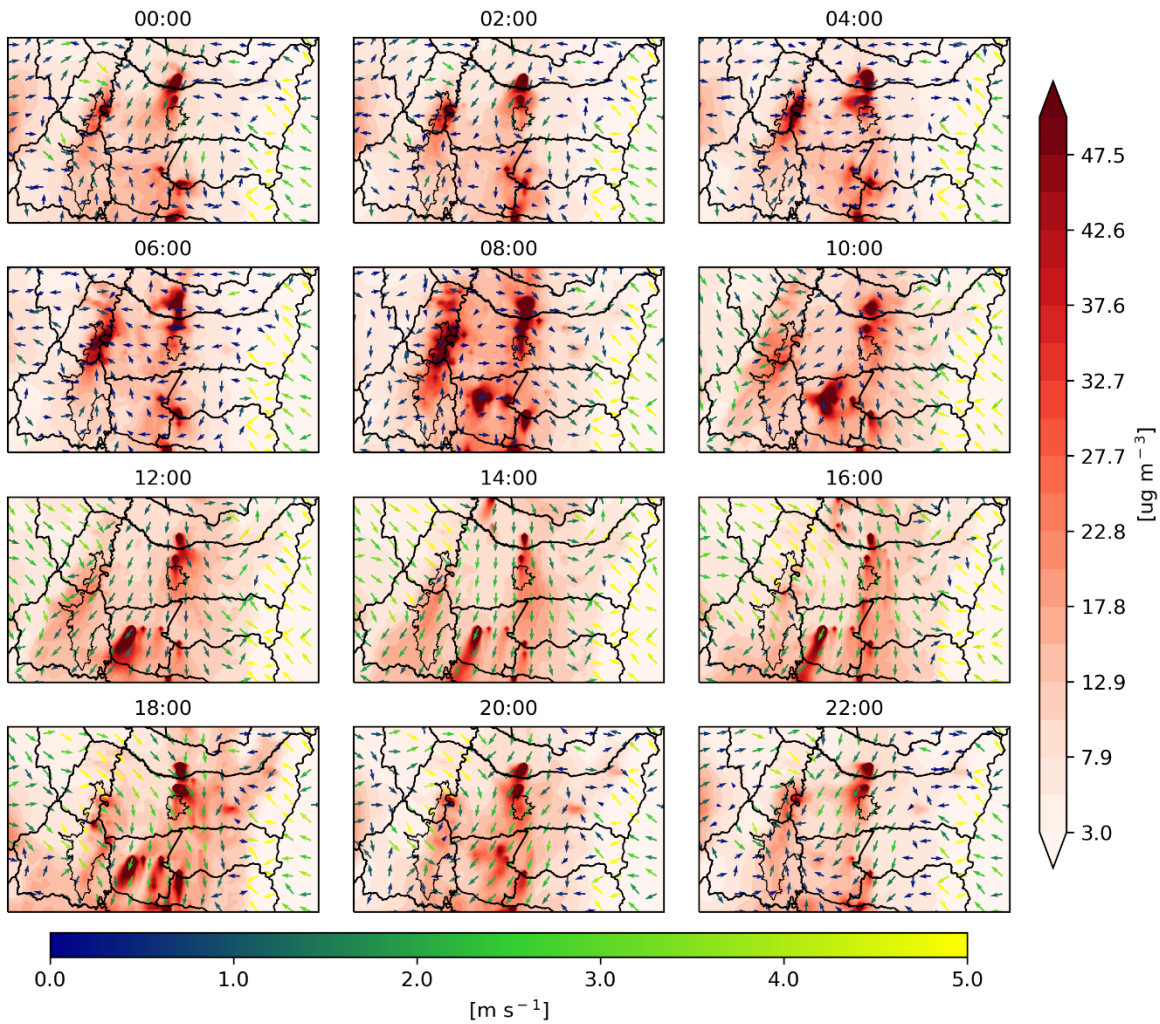


Figura 55. Mapas de concentración promedio horaria de PM_{10} y comportamiento de vientos obtenidos para el periodo 1 en el dominio de simulación de 1 km de resolución Acercamiento sobre Yumbo y Palmira
 Fuente: Elaboración propia.

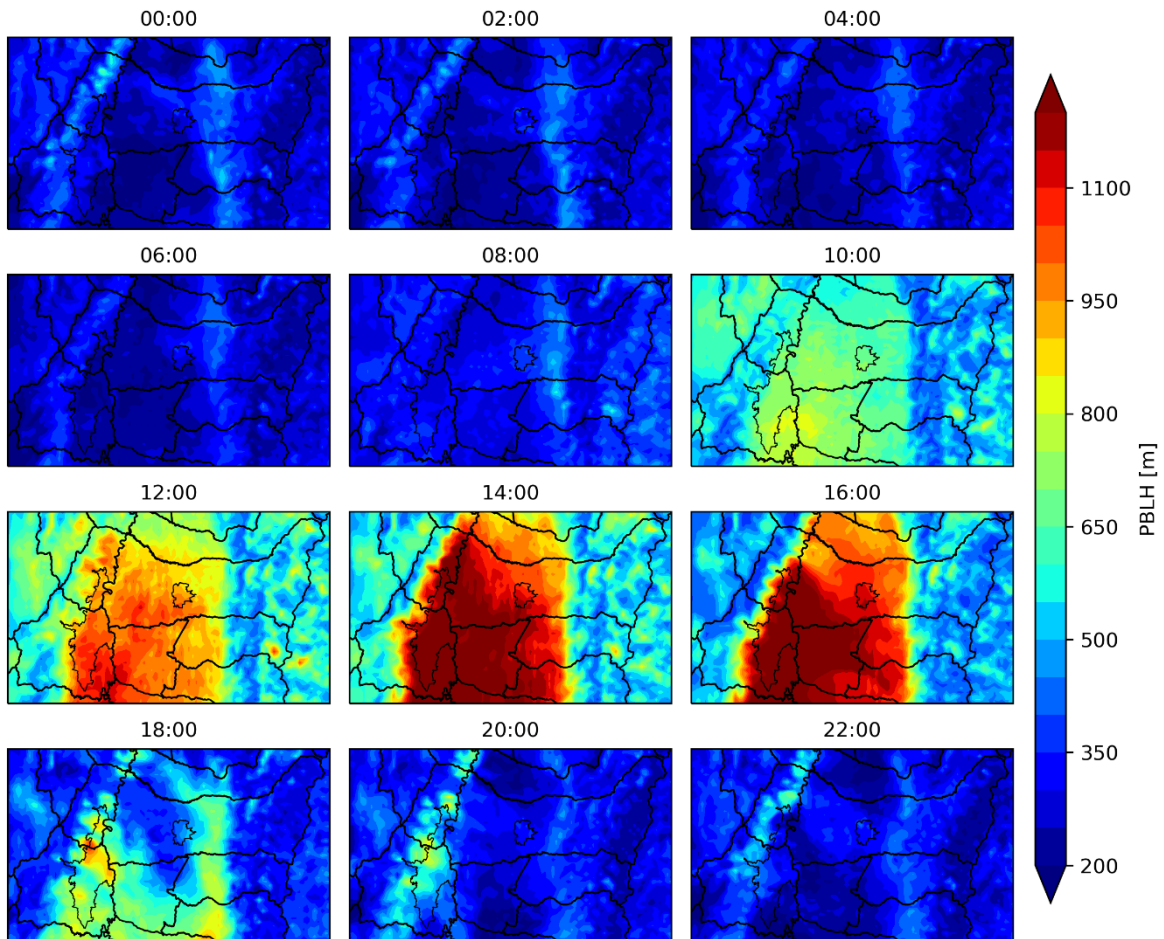


Figura 56. Mapa de altura promedio de la capa de mezcla simulada para distintas horas del día. Acercamiento sobre los municipios de Yumbo y Palmira
Fuente: Elaboración propia.

Como se discutió previamente, la simulación del perfil diurno de la altura de capa de mezcla juega un papel crucial en la dispersión de contaminantes, y por lo tanto, en la representación de los niveles de concentración que se alcanzan en la región de simulación. Por tal motivo, garantizar una buena representación de este parámetro es fundamental en ejercicios de simulación de contaminantes atmosféricos. Con el objetivo de ampliar los resultados obtenidos en relación con la simulación de la altura de capa de mezcla, se graficaron los mapas de altura promedio de capa de mezcla simulada para distintas horas del día (Figura 56) y el perfil horario simulado de esta variable para el periodo 1 en la estación UVA, el cual se comparó contra el perfil horario de capa límite atmosférica estimado a partir de mediciones LiDAR durante el mes de agosto de 2018 en la misma estación. La información de mediciones LiDAR fue proporcionada por Céspedes (2019). La Figura 57 muestra los perfiles obtenidos, en donde se aprecia que el modelo sigue de manera adecuada la evolución de la capa de mezcla hasta cerca de las 17:00 hora local. Luego de esta hora el modelo predice una disminución en la altura de capa de mezcla, al contrario de las mediciones LiDAR que predicen un ligero aumento. Es importante destacar que las

mediciones LiDAR tienen en cuenta el valor de la capa residual, lo que explica el comportamiento observado de la capa límite atmosférica después de las 17 horas. Los resultados obtenidos por el modelo de simulación no tienen en cuenta la altura de capa residual en el perfil diario de capa límite, de allí las diferencias obtenidas en relación con las mediciones del LiDAR.

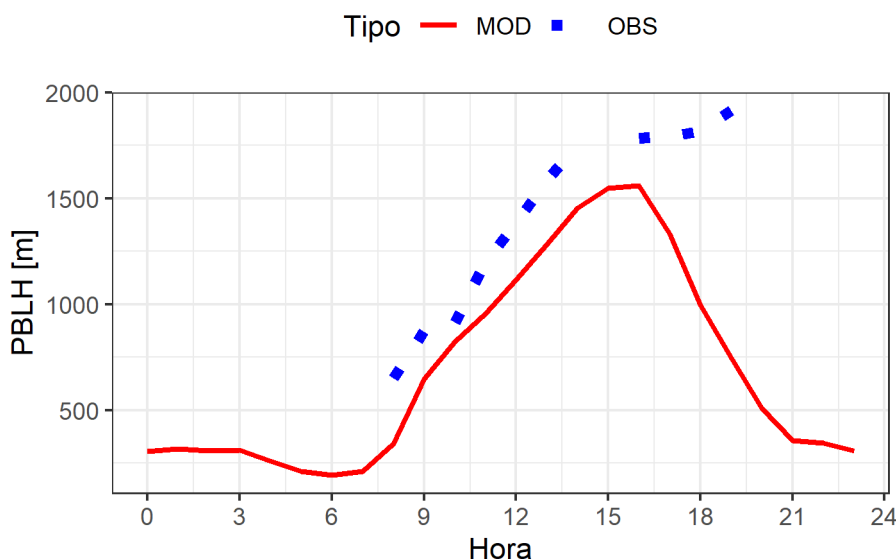


Figura 57. Comparación del perfil promedio diario de altura de capa de mezcla simulada para el periodo 1 frente a estimaciones de capa límite atmosférica obtenidos mediante mediciones LiDAR (Céspedes, 2019) en la estación UVA durante el mes de agosto de 2018
Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.4. Mapas de concentración promedio de material particulado y comparación preliminar con normativa colombiana

De manera complementaria a los mapas de concentración horaria, se elaboraron mapas de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para todo el periodo de simulación (28 días en cada periodo), los cuales se presentan en la Figura 58. Estos mapas permiten identificar zonas de máximos y mínimos de concentración, y brindan además una base comparativa preliminar en relación con el cumplimiento de los límites normativos de concentración promedio anual de PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) establecidos en la Resolución 2254 de 2017.

Adicionalmente, se realizaron mapas de concentración promedio realizando un acercamiento a las cabeceras municipales de los municipios de Yumbo (Figura 59) y Palmira (Figura 60).

Para el caso de Palmira, la zona urbana de dicho municipio no presentaría excederías al límite normativo anual. Sin embargo, al norte de la zona urbana se presentan zonas donde los valores de concentración están por encima de la normativa anual tanto para el PM_{10} como para el $PM_{2.5}$.

De otra parte, la zona urbana de Yumbo no se presentan zonas críticas en relación con concentraciones de PM_{10} . Sin embargo, para el $PM_{2.5}$ los resultados promedio, principalmente aquellos obtenidos en el periodo 2, sugieren regiones al oriente y sur del área urbana donde se podrían estar presentando concentraciones promedio por encima de los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

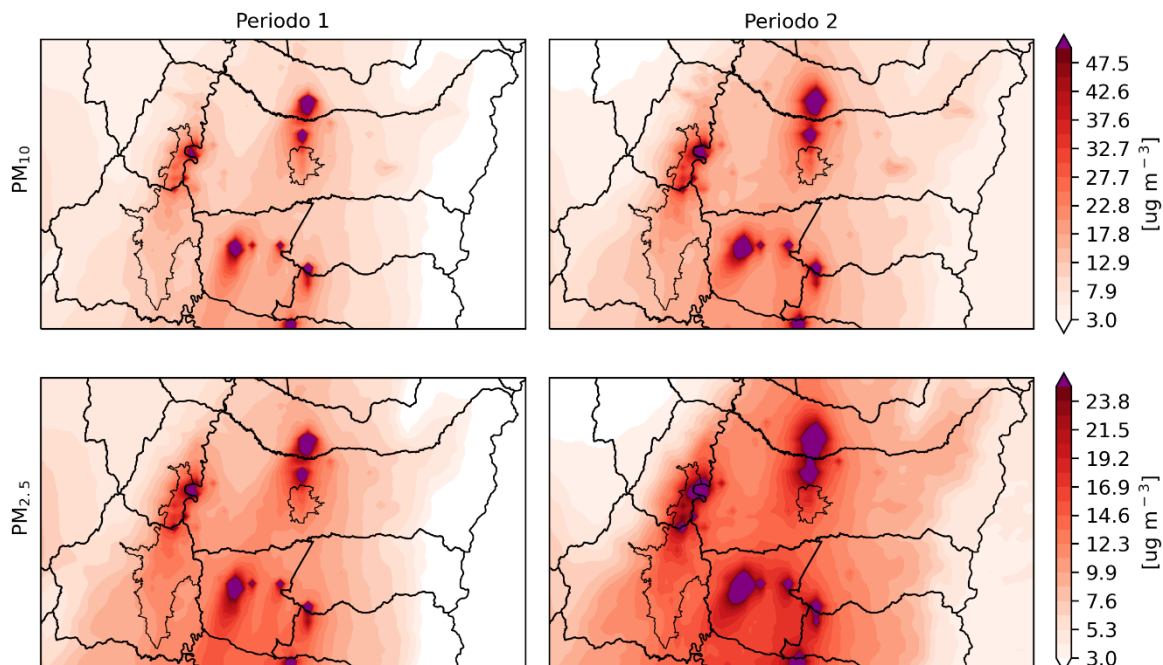


Figura 58. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre los municipios de Yumbo y Palmira. Las regiones en morado corresponden a zonas con concentraciones promedio iguales o superiores a los límites normativos anuales definidos en la Resolución 2254 de 2017

Fuente: Elaboración propia.

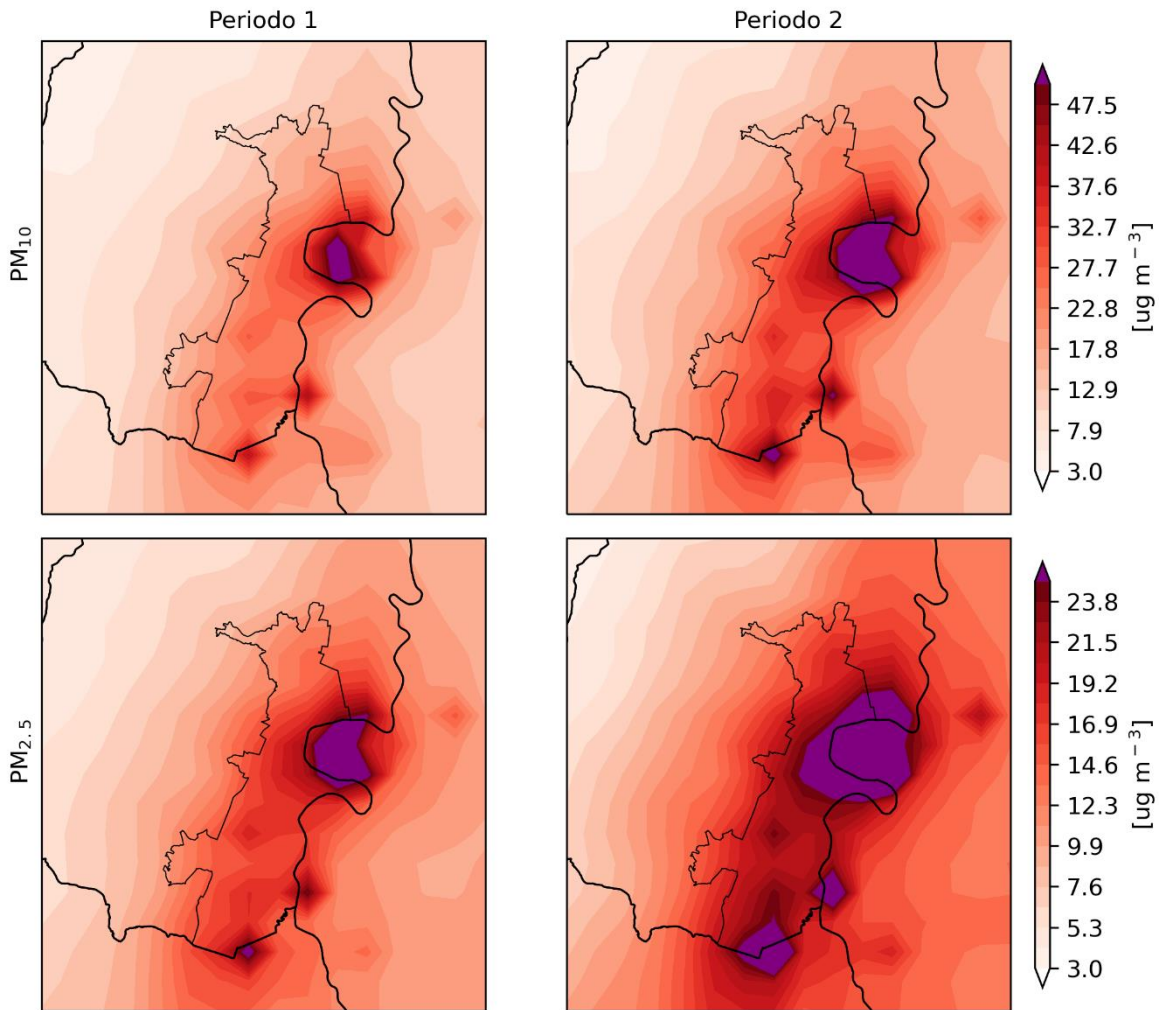


Figura 59. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre la zona urbana del municipio de Yumbo. Las regiones en morado corresponden a zonas con concentraciones promedio iguales o superiores a los límites normativos anuales definidos en la Resolución 2254 de 2017

Fuente: Elaboración propia.

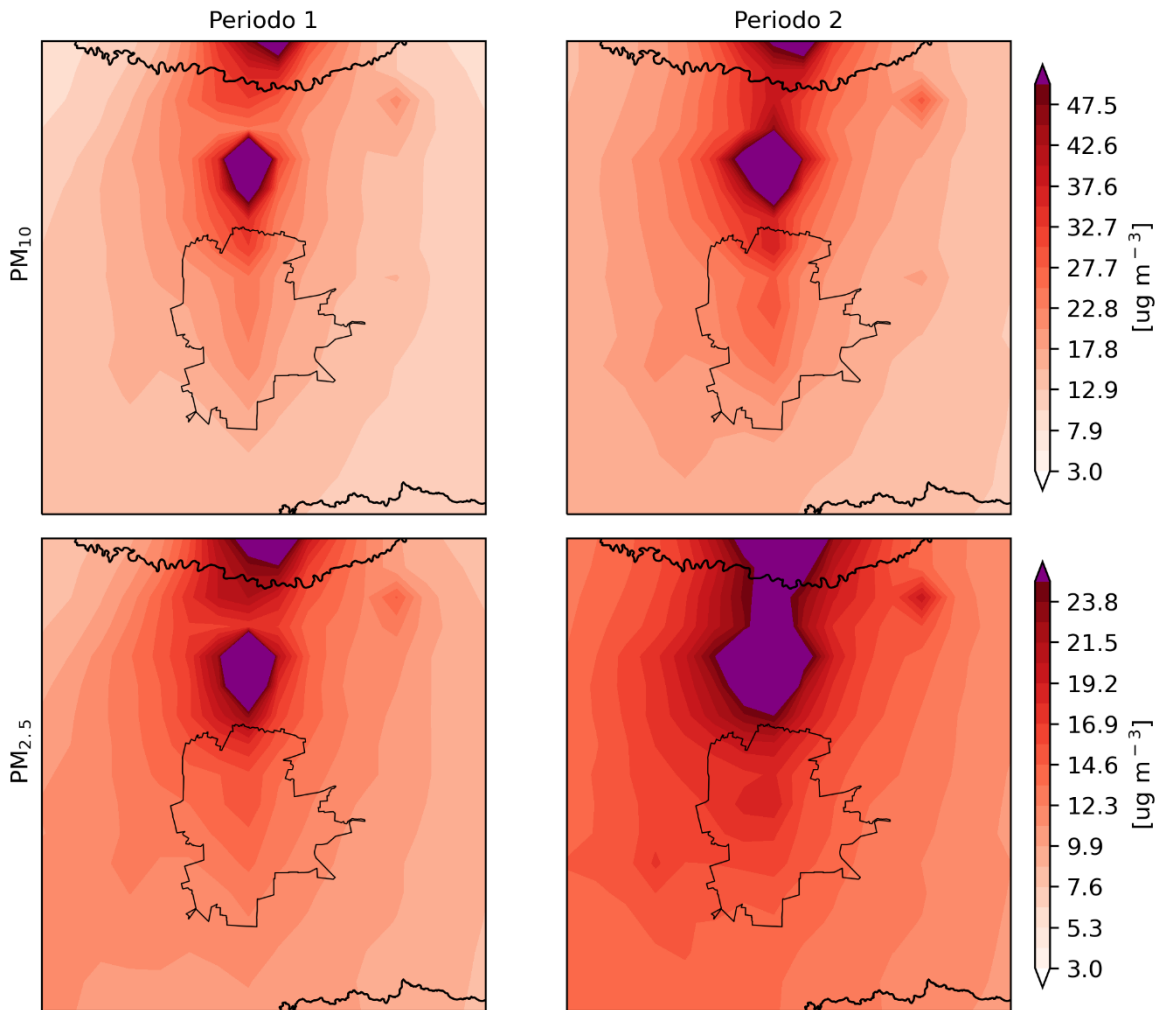


Figura 60. Mapa de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos para los periodos completos de simulación con acercamiento sobre la zona urbana del municipio de Palmira. Las regiones en morado corresponden a zonas con concentraciones promedio iguales o superiores a los límites normativos anuales definidos en la Resolución 2254 de 2017

Fuente: Elaboración propia.

3.4. EJERCICIO DE ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN DE FUENTES AL MATERIAL PARTICULADO

El análisis de contribución de fuentes consistió en realizar simulaciones de calidad del aire con el modelo WRF-Chem retirando una fuente o grupo de fuentes de la simulación. Las concentraciones simuladas en diversos ejercicios fueron comparadas con las concentraciones obtenidas en el ejercicio base de simulación, proceso a través del cual fue posible identificar las diferencias de concentración absoluta y el porcentaje de contribución

relativa que tienen las fuentes retiradas sobre la concentración de material particulado en la región de simulación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se priorizaron seis ejercicios para análisis de contribución de fuentes, los cuales se resumen en la Tabla 24, describiendo la pregunta específica que se planteó responder con cada ejercicio y las modificaciones realizadas al archivo de emisión para llevar a cabo la simulación en cada caso.

Tabla 24. Ejercicios propuestos para análisis de contribución de fuentes al material particulado

No. Simulación	Pregunta a resolver	Modificaciones al archivo de emisión para la simulación de calidad del aire
ID1	¿Cuál es el impacto de las emisiones por quemas abiertas precosecha e incendios en la concentración de PM en el área de estudio?	Se suprimen la totalidad de las emisiones por quemas abiertas precosecha e incendios estimadas en el VRC.
ID2	¿Cuál es el impacto de las emisiones industriales de Yumbo y Palmira en la concentración de PM en el área de estudio?	Se suprimen la totalidad de las emisiones por fuentes estacionarias puntuales (sector industrial) de Yumbo y Palmira
ID3	¿Cuál es el impacto de las emisiones de Cali (móviles y estacionarias) en la concentración de PM sobre Yumbo y Palmira?	Se suprimen la totalidad de las emisiones por fuentes móviles y estacionarias de Santiago de Cali
ID4	¿Cuál es el impacto de emisiones regionales del VRC sobre la concentración de PM en Yumbo y Palmira?	Se suprime la totalidad de emisiones del inventario de emisión en jurisdicción de Yumbo y Palmira
ID5	¿Cuál es el impacto de las emisiones pecuarias (amoniaco principalmente) en la concentración de PM?	Se suprimen la totalidad de las emisiones por actividades pecuarias
ID6	¿Cuál es el impacto de las emisiones industriales de Yumbo en la concentración de PM en el área de estudio?	Se suprimen la totalidad de las emisiones por fuentes estacionarias puntuales (sector industrial) de Yumbo.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1. Periodos de simulación y configuración del modelo en los ejercicios de contribución de fuentes

Se realizaron en total 6 simulaciones con el modelo WRF-Chem con una duración de una semana, comprendida entre el 30 de Julio al 6 de agosto de 2018. Estas fechas coinciden con las utilizadas en la simulación base para el periodo 1, lo cual permite no solo que las condiciones meteorológicas sean idénticas en todos los casos, sino también que las

diferencias obtenidas en las simulaciones sean atribuibles de manera exclusiva a las modificaciones en los archivos de emisión.

La configuración de dominios, datos estáticos y condiciones iniciales y de contorno químicas y meteorológicas descritas previamente, así como el uso del mecanismo químico RACM – MADE/VBS se conservaron en el proceso de simulación de los ejercicios de contribución de fuentes propuestos.

3.4.1.1. Procedimiento para determinación de diferencias absolutas y porcentuales en los ejercicios de contribución de fuentes

Para determinar la contribución de las fuentes de emisión evaluadas a la concentración de material particulado, se realizaron comparaciones entre las predicciones del modelo al remover dicha fuente de emisión y las concentraciones predichas en el ejercicio base de simulación, en el cual todas las fuentes estaban presentes. Estas comparaciones se realizaron en función de valores obtenidos en términos de concentración absoluta, y la variación porcentual según la disminución o aumento de la concentración de material particulado para cada ejercicio propuesto.

La contribución absoluta (C_A) da cuenta de la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que puede ser atribuibles a una fuente o grupo de fuentes, y se estima al calcular la diferencia entre la concentración del contaminante i en el ejercicio de simulación j ($C_{i,j}$) y la concentración del contaminante i en el ejercicio de simulación base ($C_{i,base}$), tal como se representa en la ecuación 1. De otro lado, la contribución porcentual (C_P) permite establecer el porcentaje de contribución que tiene una fuente sobre el nivel de contaminación de un área en relación con un contaminante específico (en este caso material particulado), y se estimó siguiendo la ecuación 2.

$$C_A = C_{i,j} - C_{i,base} \quad \text{EC. 1}$$

$$C_P(\%) = (1 - C_{i,j}/C_{i,base}) * 100 \quad \text{EC. 2}$$

La estimación de la contribución de cada fuente evaluada fue realizada siguiendo dos aproximaciones distintas. En primera instancia, se evaluó la contribución promedio por regiones geográficas de interés, definidas en términos de polígonos que cubren el área urbana de Palmira, área urbana de Yumbo, Cali (dividido en sectores norte y sur) y un polígono de control ubicado en medio de Palmira y Yumbo. La ubicación exacta de estas áreas se detalla en la Figura 61. En una segunda aproximación se calcularon los valores de contribución absoluta en cada ejercicio para cada una de las celdas individuales que conforman el dominio de simulación.

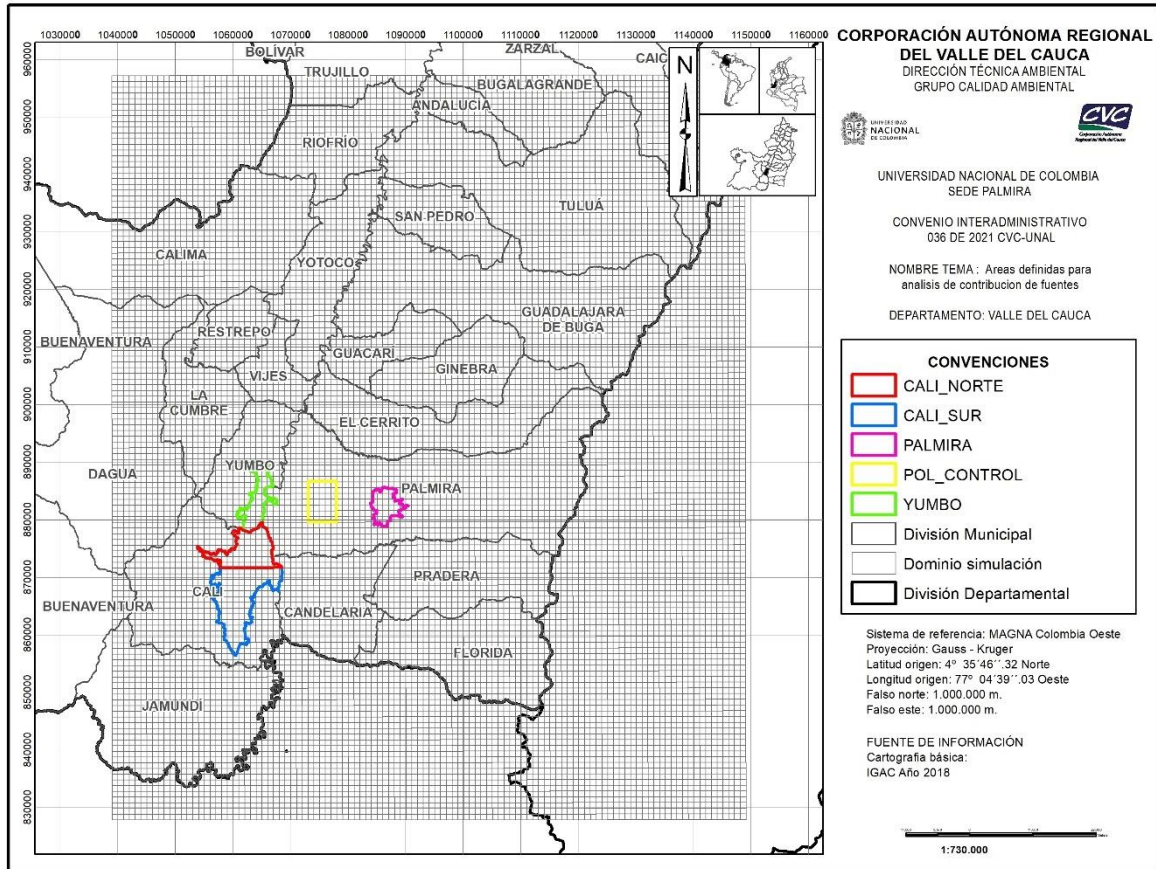


Figura 61. Polígonos definidos para el análisis de contribución de fuentes

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Resultados obtenidos en términos de contribución porcentual para cada ejercicio propuesto

En la Tabla 25 se resumen los resultados la concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos en las regiones de análisis (polígonos descritos previamente) para el ejercicio de simulación base (ID0) y cada uno de los ejercicios de contribución de fuentes (ID1 a ID6). Asimismo, se presenta en la Tabla 26 la contribución porcentual promedio estimada en cada ejercicio y asociada a cada polígono. Partiendo los resultados obtenidos se plantean las siguientes consideraciones de análisis enfocadas en los resultados del contaminante $PM_{2.5}$, aclarando que los resultados para PM_{10} tuvieron un comportamiento similar en términos comparativos.

Ejercicio ID0 – Simulación base: De las áreas priorizadas para análisis, Yumbo presenta la concentración promedio más elevada de material particulado (PM_{10} : $25.4 \pm 8.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$: $17.6 \pm 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido por Palmira (PM_{10} : $24.2 \pm 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$: $16.5 \pm 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la zona norte Cali (PM_{10} : $18.3 \pm 5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5}$: $14.0 \pm 3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Es llamativo que el polígono de control ubicado en una región intermedia entre Yumbo Y Palmira (ver

Figura 62), presente las concentraciones más bajas dentro de las regiones evaluadas, resultado que sugiere inicialmente una reducida dinámica de transporte de material particulado entre la zona urbana de Palmira a Yumbo.

Ejercicio ID1 – Contribución de quemas abiertas precosecha e incendios. Para el periodo analizado, las quemas abiertas representaron una contribución porcentual a la concentración de $PM_{2.5}$ sobre Palmira del 1.8% ($\pm 2.8\%$) y Yumbo del 4.4 ($\pm 1.6\%$). Es importante resaltar que, por la característica aleatoria en cuanto a la ubicación y duración de las quemas, este resultado puede presentar variaciones según el periodo de simulación analizado.

Ejercicio ID2 – Contribución de emisiones industriales de Yumbo y Palmira. Los resultados obtenidos sugieren que estas fuentes son responsables del 20.9% ($\pm 6.5\%$) y 22.9% ($\pm 6.8\%$) de la concentración de $PM_{2.5}$ en Yumbo y Palmira respectivamente. Estas emisiones tienen un aporte a los niveles de $PM_{2.5}$ sobre Cali, en promedio con 16.9% ($\pm 8.6\%$) del $PM_{2.5}$ en la zona norte y 9.1% ($\pm 1.3\%$) en la zona sur de análisis.

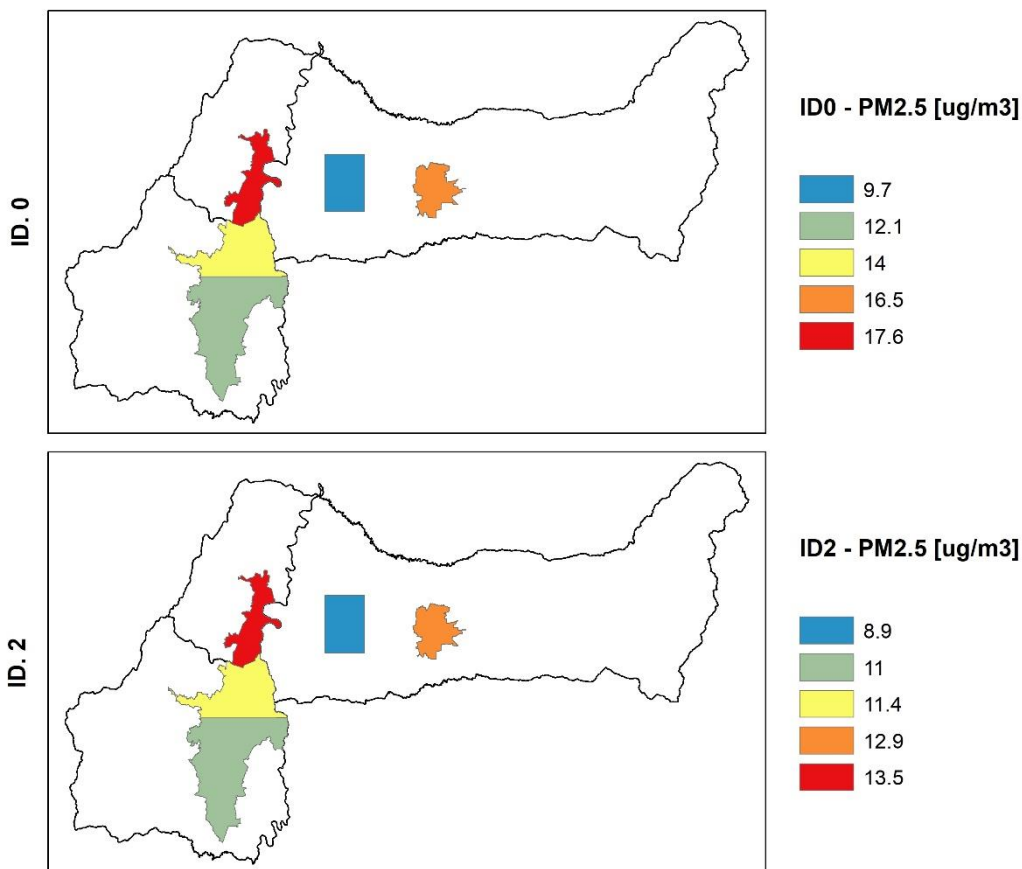


Figura 62. Concentración promedio de $PM_{2.5}$ obtenida por regiones de interés para el ejercicio base ID0 y el ejercicio de contribución de fuentes ID2.

Fuente: Elaboración propia.

Ejercicio ID3 – Contribución de emisiones de Santiago de Cali. Las emisiones industriales y móviles del municipio de Santiago Cali representan un aporte en términos de $PM_{2.5}$ cercano al 19.2% ($\pm 7.6\%$) en la región norte y 16.4% ($\pm 6.8\%$) en la región sur de dicho municipio. De otra parte, los resultados simulados sugieren que el aporte debido a transporte de $PM_{2.5}$ en los municipios de Yumbo (3.7% $\pm 2.5\%$) y Palmira (0.1% $\pm 1.9\%$) fue poco significativo.

Ejercicio ID4 – Contribución de emisiones en jurisdicción de Yumbo y Palmira. Para el periodo de simulación, las emisiones originadas en Yumbo y Palmira contribuyeron con el 32.2% ($\pm 6.7\%$) de la concentración de $PM_{2.5}$ en el área urbana de Palmira, lo que sugiere que cerca del 68% de la concentración simulada se explica por transporte de contaminantes desde otras regiones del área de influencia. En el caso del área urbana de Yumbo, las emisiones en Yumbo y Palmira explican 54.2% ($\pm 8.5\%$) de la concentración de $PM_{2.5}$ simulada, lo que sugiere una contribución cercana al 46% proveniente de transporte de regiones cercanas.

Ejercicio ID5 – Contribución de emisiones por actividades pecuarias. En términos relativos las emisiones pecuarias aportan una baja fracción de la concentración de PM_{10} ($< 3.0\%$) y $PM_{2.5}$ ($< 4.5\%$) simulada sobre los municipios de Yumbo y Palmira.

Ejercicio ID6 – Contribución de emisiones industriales de Yumbo. Según los resultados de simulación, la industria de Yumbo contribuyó con el 18.3% ($\pm 6.4\%$) de la concentración de $PM_{2.5}$ simulada en Yumbo. Su aporte se extiende principalmente a la zona norte de Cali con una contribución cercana al 10.1% ($\pm 8.7\%$) del $PM_{2.5}$ simulado. Los resultados sugieren que el impacto de esta fuente sobre la concentración de material particulado en Palmira es prácticamente nulo.

Tabla 25. Concentración promedio por áreas de análisis

Región	ID0	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
PM_{10} [$\mu g/m^3$]							
Palmira	24.2 ± 4.8	23.8 ± 5.1	18.5 ± 2.3	24.3 ± 5.2	13.4 ± 1.3	23.5 ± 5.0	24.5 ± 5.6
Yumbo	25.4 ± 8.2	24.4 ± 7.9	19.4 ± 7.0	24.5 ± 7.8	8.6 ± 1.0	25.3 ± 8.7	20.5 ± 7.5
Cali – Norte	18.3 ± 5.3	17.5 ± 5.1	14.6 ± 2.5	14.2 ± 5.1	12.6 ± 2.1	17.9 ± 5.5	15.9 ± 2.5
Cali – Sur	14.5 ± 1.4	13.7 ± 1.5	13.2 ± 1.2	11.4 ± 0.5	12.5 ± 1.1	13.6 ± 1.5	13.8 ± 1.4
Pol. Control	11.3 ± 0.5	10.8 ± 0.7	10.3 ± 0.3	11.4 ± 0.5	8.8 ± 0.4	10.9 ± 0.7	10.9 ± 0.5
$PM_{2.5}$ [$\mu g/m^3$]							
Palmira	16.5 ± 2.0	16.2 ± 2.1	12.9 ± 0.6	16.5 ± 2.2	11.1 ± 0.8	15.8 ± 2.1	16.7 ± 2.5
Yumbo	17.6 ± 4.3	16.8 ± 4.1	13.5 ± 3.5	16.9 ± 4.1	7.7 ± 0.8	17.4 ± 4.5	14.3 ± 3.8
Cali – Norte	14.0 ± 3.2	13.3 ± 3.0	11.4 ± 1.5	11.4 ± 3.0	10.3 ± 1.3	13.6 ± 3.3	12.3 ± 1.5
Cali – Sur	12.1 ± 0.8	11.5 ± 0.9	11.0 ± 0.7	10.1 ± 0.5	10.6 ± 0.6	11.3 ± 0.9	11.5 ± 0.8
Pol. Control	9.7 ± 0.4	9.3 ± 0.5	8.9 ± 0.2	9.8 ± 0.4	8.1 ± 0.3	9.4 ± 0.5	9.4 ± 0.4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Contribución porcentual promedio por área de análisis

Región	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
PM₁₀ [%]						
Palmira	1.8 ± 3.0	22.7 ± 6.2	-0.2 ± 1.7	43.1 ± 9.8	3.0 ± 2.5	-0.6 ± 3.1
Yumbo	3.8 ± 1.7	23.2 ± 7.9	3.3 ± 2.8	63.8 ± 9.0	0.8 ± 3.8	19.2 ± 7.7
Cali – Norte	4.4 ± 1.4	17.9 ± 9.5	22.0 ± 9.5	28.2 ± 12.9	2.7 ± 1.6	10.7 ± 9.6
Cali – Sur	5.2 ± 2.1	8.8 ± 1.5	20.9 ± 8.3	13.7 ± 2.0	6.3 ± 2.6	4.7 ± 2.1
Pol. Control	4.6 ± 3.9	8.7 ± 2.3	-1.0 ± 2.6	21.8 ± 2.2	3.1 ± 3.8	3.2 ± 2.5
PM_{2.5} [%]						
Palmira	1.8 ± 2.8	20.9 ± 6.5	0.1 ± 1.9	32.2 ± 6.7	4.5 ± 2.5	-0.8 ± 3.3
Yumbo	4.4 ± 1.6	22.9 ± 6.8	3.7 ± 2.5	54.2 ± 8.5	1.3 ± 3.5	18.3 ± 6.4
Cali – Norte	4.6 ± 1.3	16.9 ± 8.6	19.2 ± 7.6	24.2 ± 10.8	3.2 ± 1.5	10.1 ± 8.7
Cali – Sur	4.9 ± 1.7	9.1 ± 1.3	16.4 ± 6.8	12.7 ± 1.7	6.8 ± 2.5	5.1 ± 2.0
Pol. Control	3.9 ± 3.9	8.0 ± 2.4	-1.3 ± 2.6	17.0 ± 1.8	2.7 ± 3.9	3.1 ± 2.4

Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Resultados obtenidos en términos de contribución absoluta

Adicional a la contribución porcentual, también se estimó la contribución absoluta al material particulado para los diferentes ejercicios realizados. Los valores promedio de concentración por región se presentan en la Tabla 27, mientras que los mapas de contribución absoluta de PM_{2.5} para toda el área de simulación se presentan en la Figura 63 y Figura 64. Los mapas para la fracción de PM₁₀ pueden consultarse en el Anexo 15. Los resultados obtenidos permitieron plantear las siguientes consideraciones.

Ejercicio ID1 – Contribución de quemas abiertas precosecha e incendios. Las quemas abiertas precosecha e incendios tienen un impacto significativo en regiones cercanas a la zona de ocurrencia de la quema. A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 63 que al retirar esta fuente de emisión se logra una reducción cercana a 5 µg/m³ de PM_{2.5} en los municipios de Tuluá y Rio Frio, donde se dieron varios episodios de quema cercanos durante el periodo simulado.

De otra parte, analizando específicamente los municipios de interés de este Convenio, el impacto de las quemas abiertas no fue tan significativo, evidenciándose reducciones inferiores a 1 µg/m³ de PM_{2.5} sobre Palmira y Yumbo. Es importante resaltar que este resultado es específico del periodo simulado, ya que las quemas abiertas pueden ocurrir en diferentes puntos del VRC a lo largo del año, con lo cual, si las quemas del periodo simulado hubiesen ocurrido más cerca de las áreas urbanas de los municipios de Yumbo y Palmira, el aporte a los niveles de contaminación de material particulado podría ser más representativo.

Ejercicio ID2 – Contribución de emisiones industriales de Yumbo y Palmira. Las emisiones industriales de Palmira y Yumbo contribuyeron en promedio con 3.6 y 4.1 µg/m³ de PM_{2.5} en las zonas urbanas de Palmira y Yumbo respectivamente. Se destaca que, producto del transporte de contaminantes, esta fuente juega un papel importante sobre el

municipio de Cali, aportando en promedio $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ la región norte y $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ la región sur de Cali.

Ejercicio ID3 – Contribución de emisiones de Santiago de Cali. Las emisiones industriales y móviles de Cali generaron un impacto reducido sobre el municipio de Yumbo, contribuyendo en promedio con $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. De otra parte, el impacto sobre Palmira fue prácticamente nulo. Gracias al régimen de vientos en la región, la contaminación generada en Cali es transportada predominantemente hacia el sur y sureste, generando mayores impactos en municipios como Jamundí y Candelaria. Dentro del municipio de Cali en sus regiones norte y sur, las fuentes móviles e industriales contribuyeron en promedio con 2.6 y $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ respectivamente.

Ejercicio ID4 – Contribución de emisiones en jurisdicción de Yumbo y Palmira. La totalidad de emisiones generadas sobre Palmira y Yumbo contribuyeron con 5.4 y $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ sobre los centros urbanos de estos municipios respectivamente. Teniendo en cuenta que la concentración promedio simulada de $\text{PM}_{2.5}$ sobre Palmira y Yumbo fue de 16.5 y $17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en Palmira aproximadamente $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ podrían ser atribuibles a transporte regional, mientras que en Yumbo este valor de contribución regional estaría en promedio alrededor de los $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ejercicio ID5 – Contribución de emisiones por actividades pecuarias. Las emisiones por actividades pecuarias afectan casi la totalidad del área del VRC como se aprecia en la Figura 64. Sin embargo, el valor de contribución absoluta es relativamente bajo ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$) según los resultados en las regiones de análisis, como Yumbo, Palmira y Cali.

Ejercicio ID6 – Contribución de emisiones industriales de Yumbo. La industria de Yumbo por si sola aportó alrededor de $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$ a la concentración promedio simulada en la zona urbana de Yumbo, y aproximadamente $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las concentraciones promedio obtenidas en la zona norte de Cali. Por el contrario, esta fuente de emisión no generó impactos significativos a la concentración de material particulado simulado en el área urbana de Palmira.

Tabla 27. Contribución absoluta promedio por áreas de análisis

Región	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
$\text{PM}_{10} [\mu\text{g}/\text{m}^3]$						
Palmira	-0.4 ± 0.7	-5.7 ± 2.7	0.1 ± 0.5	-10.4 ± 4.5	-0.7 ± 0.6	0.3 ± 0.9
Yumbo	-1.0 ± 0.6	-6.0 ± 2.8	-0.9 ± 0.8	-16.9 ± 7.9	-0.1 ± 1.1	-4.9 ± 2.6
Cali – Norte	-0.8 ± 0.3	-3.7 ± 4.0	-4.1 ± 2.0	-5.7 ± 5.0	-0.4 ± 0.3	-2.4 ± 3.8
Cali – Sur	-0.7 ± 0.3	-1.3 ± 0.3	-3.1 ± 1.5	-2.0 ± 0.4	-0.9 ± 0.3	-0.7 ± 0.3
Pol. Control	-0.5 ± 0.4	-1.0 ± 0.3	0.1 ± 0.3	-2.5 ± 0.3	-0.4 ± 0.4	-0.4 ± 0.3
$\text{PM}_{2.5} [\mu\text{g}/\text{m}^3]$						
Palmira	-0.3 ± 0.5	-3.6 ± 1.5	0.0 ± 0.3	-5.4 ± 1.7	-0.7 ± 0.4	0.2 ± 0.6
Yumbo	-0.8 ± 0.4	-4.1 ± 1.6	-0.7 ± 0.5	-9.9 ± 4.0	-0.2 ± 0.7	-3.3 ± 1.5
Cali – Norte	-0.7 ± 0.2	-2.6 ± 2.4	-2.6 ± 1.2	-3.7 ± 2.9	-0.4 ± 0.2	-1.7 ± 2.3
Cali – Sur	-0.6 ± 0.2	-1.1 ± 0.2	-2.0 ± 0.9	-1.6 ± 0.3	-0.8 ± 0.3	-0.6 ± 0.2

Región	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
Pol. Control	-0.4 ± 0.4	-0.8 ± 0.3	0.1 ± 0.3	-1.7 ± 0.2	-0.3 ± 0.4	-0.3 ± 0.2

Fuente: Elaboración propia.

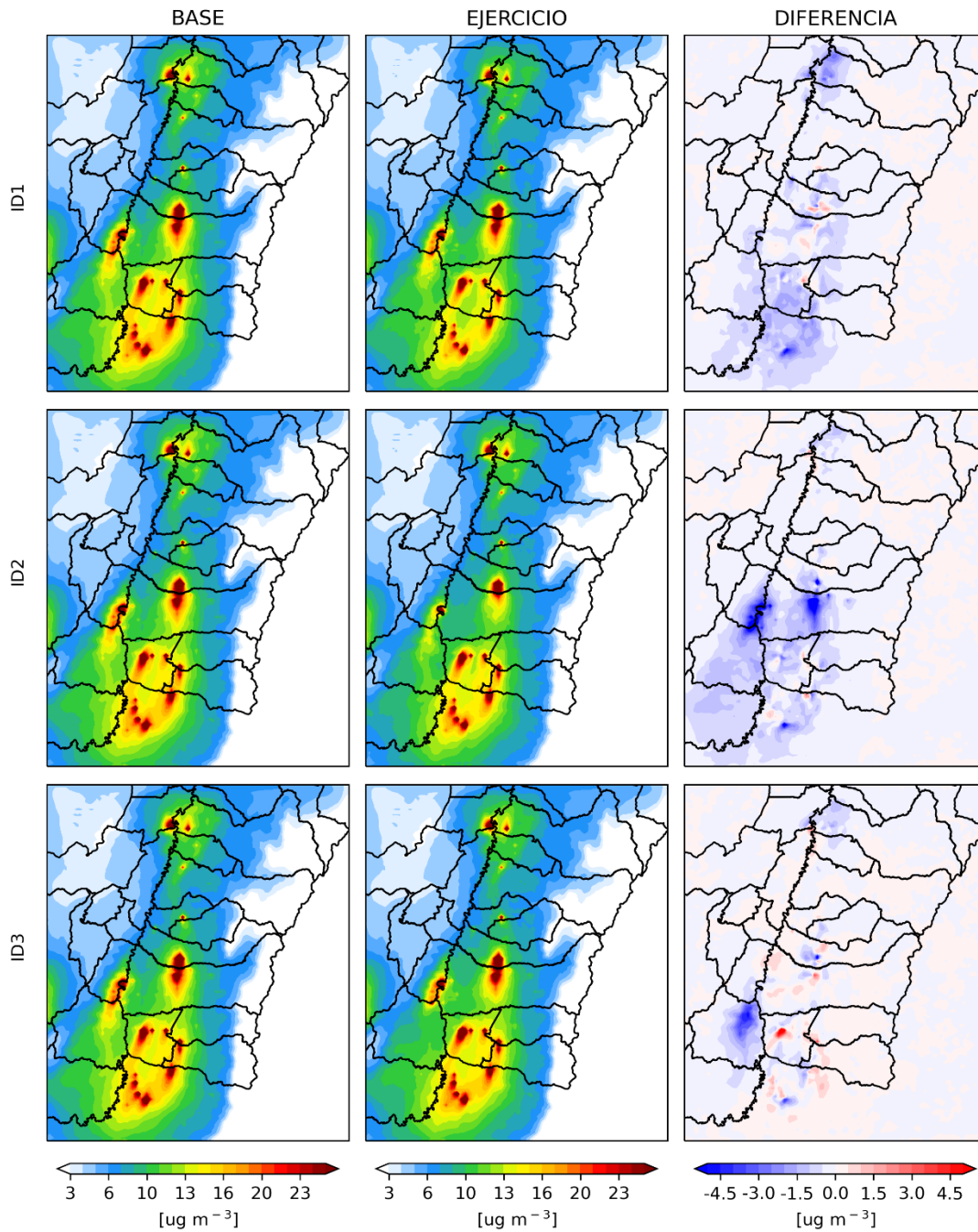


Figura 63. Mapas de concentración promedio y contribución absoluta de $PM_{2.5}$ para los ejercicios ID1, ID2 e ID3.

Fuente: Elaboración propia.

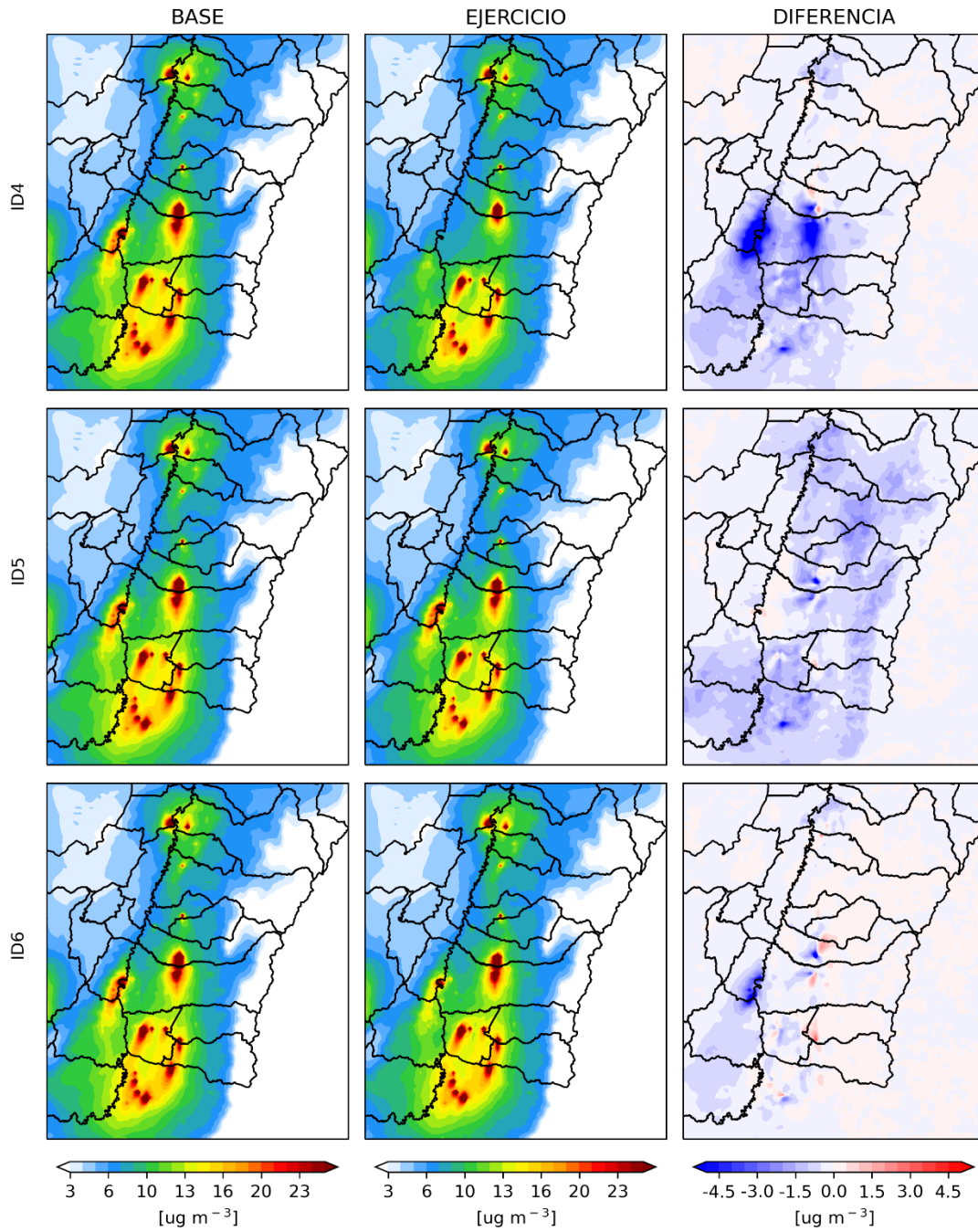


Figura 64. Mapas de concentración promedio y contribución absoluta de $\text{PM}_{2.5}$ para los ejercicios ID4, ID5 e ID6
 Fuente: Elaboración propia.

3.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la vigencia 2022 se llevaron a cabo de forma exitosa los ejercicios propuestos de simulación regional de calidad del aire en el VRC con énfasis en los municipios de Yumbo y Palmira, para el estudio de un contaminante de alta complejidad como lo es el material particulado. Los ejercicios de simulación realizados permitieron evidenciar la complejidad inherente al estudio de este contaminante en la región. Por una parte, debido a la existencia de fuentes de emisión con características diversas que se encuentran distribuidas a lo largo del VRC, esto sumado a la complejidad que presenta el Valle en relación con los fenómenos de circulación atmosférica locales y regionales que influyen el transporte de los contaminantes atmosféricos emitidos. El ejercicio realizado en desarrollo del convenio, en sus vigencias 2021 y 2022, se constituye entonces en una línea base sólida de análisis que brinda herramientas técnicas para la comprensión de las dinámicas de emisión y transporte de contaminantes como el material particulado en la región de estudio. Se destaca a su vez la necesidad de dar continuidad y profundizar en este tipo de estudios, no solo desde el punto de vista de la actualización periódica de los inventarios de emisión, sino también desde la aplicación misma de modelos de simulación regionales de calidad del aire como el WRF-Chem, con el fin no solo de tener resultados cada vez más precisos en la representación de este contaminante en la totalidad del VRC, sino también para llevar a cabo otras actividades relacionadas con el estudio de otros contaminantes primarios y secundarios, proponer un plan de descontaminación de calidad del aire y, por qué no, contar con herramientas que permitan el uso operacional del modelo para el pronóstico de la calidad del aire en la región de estudio.

Específicamente desde los resultados de la simulación de calidad del aire mediante la aplicación del modelo euleriano de última generación, WRF-Chem, se pueden destacar las siguientes conclusiones generales asociadas con los tres componentes de simulación abordados:

Dentro del componente de análisis de sensibilidad, enfocado en testear diferentes mecanismos químicos disponibles en WRF-Chem, fue posible determinar que el mecanismo RACM-MADE/VBS permitió la representación más precisa de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el área de estudio, esto sumado a que es un mecanismo computacionalmente eficiente.

Una vez definido el mecanismo químico más idóneo, las simulaciones base para los dos periodos de un mes aproximadamente incluyendo la totalidad de inventarios desarrollados para el área de influencia, fueron evaluadas y analizadas en términos cualitativos y cuantitativos a través de la estimación de estadísticos de desempeño. El proceso de validación y análisis sugirió que las predicciones de concentración hechas por el modelo para material particulado fueron subestimadas principalmente para la fracción PM_{10} , comportamiento que estuvo asociado con fenómenos complejos de contaminación de tipo local y a nivel de subgrilla, que este tipo de los modelos de escala regional normalmente no están en capacidad de representar. Sin embargo, los perfiles simulados de concentración lograron representar la dinámica diurna del material particulado en distintos puntos del

Valle, sumado a que los sesgos obtenidos estuvieron en un rango aceptable, en especial en la simulación del contaminante $PM_{2.5}$, cuya representación fue bastante satisfactoria.

Los niveles de concentración promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ simulados sobre el área urbana de Palmira estuvieron en un rango de $24.2 \pm 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16.5 \pm 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Según los resultados de la simulación, las concentraciones de PM en esta zona se ven influenciadas no solo por dinámicas de emisión locales sino también por el transporte de contaminantes emitidos por actividades industriales principalmente al norte del municipio. En el caso del área urbana de Yumbo, los valores promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ simulados estuvieron en un rango de $25.4 \pm 8.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17.6 \pm 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo el aporte de emisiones industriales y móviles generadas dentro del mismo municipio un factor importante a la contaminación de PM en esta región.

Sumado a lo anterior, la evolución de los perfiles diurnos de material particulado evidenció valores máximos de concentración principalmente en horas de la madrugada e inicios de la mañana (hasta las 09:00 horas aproximadamente), siendo una atmósfera más estable con las menores alturas capa de mezcla y la baja ventilación característica de estas horas del día, factores que favorecen una mayor acumulación de contaminantes atmosféricos en los municipios de interés como Yumbo y Palmira. Alrededor del mediodía y producto de la ventilación que se genera en el VRC por la entrada de vientos del Pacífico en horas de la tarde principalmente, la concentración de material particulado disminuye y se garantiza una mayor dispersión del contaminante en la región.

Finalmente, fue posible evaluar la contribución de fuentes de emisión principales a la concentración de material particulado en diferentes zonas de los municipios de Palmira, Yumbo y regiones cercanas en el área de influencia. Este fue un ejercicio pionero en la región de estudio y permitió evidenciar la complejidad asociada con el aporte de diversas fuentes a las concentraciones de material particulado en municipios como Yumbo y Palmira. Algunos de los resultados más relevantes indican que las emisiones industriales de Yumbo y Palmira juegan un papel importante, aportando alrededor del 23% de la concentración total de PM de dichos municipios en el periodo simulado. Por el contrario, las emisiones por quemas abiertas y emisiones pecuarias aportaron en conjunto menos del 5% de la concentración de PM de Yumbo y Palmira en el periodo de simulación escogido.

El análisis del transporte de contaminantes y el ejercicio de contribución de fuentes permiten sugerir además que las emisiones generadas en el municipio de Yumbo no generan un impacto significativo sobre Palmira, pero si tienen un impacto sobre la zona norte del municipio de Cali. Por el contrario, las emisiones generadas en Cali tienen un efecto muy bajo sobre Yumbo y prácticamente nulo a la contribución de material particulado sobre Palmira.

ANEXOS

Anexo 1 (Digital). Base de datos con información meteorológica para el periodo 2010-2020.

Anexo 2 (Digital). Base de datos con información de calidad del aire para el periodo 2016-2020.

Anexo 3 (Digital). Animaciones de las trayectorias de las plumas de emisión de trazadores por pulsos y continuos.

Anexo 4 (Digital). Inventario de emisiones de fuentes difusas en el área de influencia.

Anexo 5 (Digital). Inventario de emisiones de fuentes estacionarias en el área de influencia.

Anexo 6 (Digital). Base de datos Inventario de emisiones de fuentes estacionarias regionales.

Anexo 7 (Digital). Inventario de emisiones de fuentes móviles en el área de influencia.

Anexo 8 (Digital). Inventario de emisiones por resuspensión de fuentes móviles.

Anexo 9 (Digital). Inventario de emisiones del aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, Canteras y producción artesanal de carbón vegetal.

Anexo 10 (Digital). Inventario de emisiones de quemas abiertas en precosecha e incendios.

Anexo 11 (Digital). Compilación de los inventarios desarrollados en el área de influencia.

Anexo 12 (Digital). Archivos en formato “.tar.gz” sobre emisiones especiadas para el mecanismo RACM, para las diferentes fuentes descritas en el presente informe.

Anexo 13 (Digital). Archivo en formato “.xlsx” sobre la especiación de compuestos orgánicos volátiles para las principales fuentes identificadas en la región.

Anexo 14 (Digital). Animaciones en formato GIF representado las concentraciones promedio horaria y perfiles de vientos para los dos periodos base de simulación.

Anexo 15 (Digital). Mapas de concentración y contribución absoluta de PM₁₀ y PM_{2.5} para los ejercicios de contribución de fuentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Artursson, T., Eklöv, T., Lundström, I., Mårtensson, P., Sjöström, M., & Holmberg, M. (2000). Drift correction for gas sensors using multivariate methods. *Journal of Chemometrics*, 14(5–6), 711–723. [https://doi.org/10.1002/1099-128X\(200009/12\)14:5/6<711::AID-CEM607>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1099-128X(200009/12)14:5/6<711::AID-CEM607>3.0.CO;2-4)
- Bahreini, R., Ahmadov, R., McKeen, S. A., Vu, K. T., Dingle, J. H., Apel, E. C., Blake, D. R., Blake, N., Campos, T. L., Cantrell, C., Flocke, F., Fried, A., Gilman, J. B., Hills, A. J., Hornbrook, R. S., Huey, G., Kaser, L., Lerner, B. M., Mauldin, R. L., ... Weinheimer, A. (2018). Sources and characteristics of summertime organic aerosol in the Colorado Front Range: Perspective from measurements and WRF-Chem modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(11), 8293–8312. <https://doi.org/10.5194/ACP-18-8293-2018>
- Balzarini, A., Pirovano, G., Honzak, L., Žabkar, R., Curci, G., Forkel, R., Hirtl, M., San José, R., Tuccella, P., & Grell, G. A. (2015). WRF-Chem model sensitivity to chemical mechanisms choice in reconstructing aerosol optical properties. *Atmospheric Environment*, 115, 604–619. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.12.033>
- Barbet, C., Deguillaume, L., Chaumerliac, N., Leriche, M., Freney, E., Colomb, A., Sellegri, K., Patryl, L., & Armand, P. (2016). Evaluation of Aerosol Chemical Composition Simulations by the WRF-Chem Model at the Puy de Dôme Station (France). *Aerosol and Air Quality Research*, 16(3), 909–917. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2015.05.0342>
- Berger, A., Barbet, C., Leriche, M., Deguillaume, L., Mari, C., Chaumerliac, N., Bègue, N., Tulet, P., Gazen, D., & Escobar, J. (2016). Evaluation of Meso-NH and WRF/CHEM simulated gas and aerosol chemistry over Europe based on hourly observations. *Atmospheric Research*, 176–177, 43–63. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2016.02.006>
- Betancur. (2015). Contaminación atmosférica y mecanismo de contrl de la contaminación en el municipio de Yumbo. *Universidad Del Valle, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas*, 3, 2015.
- Céspedes, J. (2019). *Implementación de un sistema LiDAR elástico para la observación de la dinámica de aerosoles sobre el área urbana de Cali* [Universidad del Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/14229?show=full>
- Cifuentes, F., González, C. M., & Aristizábal, B. H. (2021). Insights to WRF-Chem sensitivity in a zone of complex terrain in the tropical Andes: Effect of boundary conditions, chemical mechanisms, nesting, and domain configuration. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101093. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101093>
- CVC, (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca). (2019). *Informe de la calidad del aire 2019*.
- Fry, J. L., & Sackinger, K. (2012). Model investigation of NO₃ secondary organic aerosol

- (SOA) source and heterogeneous organic aerosol (OA) sink in the western United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8797–8811. <https://doi.org/10.5194/ACP-12-8797-2012>
- Gómez, C. D. (2017). *Desagregación espacial y temporal del inventario de emisiones por fuentes antropogénicas para la ciudad de Manizales* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77487/1075271961.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González, C. M., Gómez, C. D., & Aristizábal, B. H. (2020). DROVE: An Algorithm for Spatial and Temporal Disaggregation of On-road Vehicle Emission Inventories. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(12), 2765–2779. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0184>
- González, C. M., Ynoue, R., Vara-Vela, A., Rojas, N., & Aristizábal, B. (2018). High-resolution air quality modeling in a medium-sized city in the tropical Andes: Assessment of local and global emissions in understanding ozone and PM 10 dynamics. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 934–948. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.03.003>
- Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., & Wang, X. (2012). The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): An extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471–1492. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>
- IDEAM. (2019). *Manual De Crítica Estadísticas De Monitoreo Y Seguimiento De La Calidad Del Aire (Emsca)*. 02, 15.
- Kumar, A., Jimenez, R., Belalcazar, L. C., & Rojas, N. Y. (2016). Application of WRF-Chem model to simulate PM10 concentration over Bogota. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(5), 1206–1221. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0318>
- Li, G., Zavala, M., Lei, W., Tsimpidi, A. P., Karydis, V. A., Pandis, S. N., Canagaratna, M. R., & Molina, L. T. (2011). Simulations of organic aerosol concentrations in Mexico City using the WRF-CHEM model during the MCMA-2006/MILAGRO campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(8), 3789–3809. <https://doi.org/10.5194/ACP-11-3789-2011>
- López, M., & Howell, W. (1967). Katabatic Winds in the Equatorial Andes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68–70.
- Ma, T., Duan, F., He, K., Qin, Y., Tong, D., Geng, G., Liu, X., Li, H., Yang, S., Ye, S., Xu, B., Zhang, Q., & Ma, Y. (2019). Air pollution characteristics and their relationship with emissions and meteorology in the Yangtze River Delta region during 2014–2016. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 83, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.02.031>
- Mao, J., Zhou, L., Wu, L., Chen, W., Wang, X., & Yu, P. (2021). Evaluation of Biogenic Organic Aerosols in the Amazon Rainforest Using WRF-Chem With MOSAIC. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(23), e2021JD034913. <https://doi.org/10.1029/2021JD034913>

- Mar, K. A., Ojha, N., Pozzer, A., & Butler, T. M. (2016). Ozone air quality simulations with WRF-Chem (v3.5.1) over Europe: Model evaluation and chemical mechanism comparison. *Geoscientific Model Development*, 9(10), 3699–3728. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3699-2016>
- Mateus-Fontecha, Lady, Vargas-Burbano, A., Jimenez, R., Rojas, N. Y., Rueda-Saa, G., Van Pinxteren, D., Van Pinxteren, M., Fomba, K. W., & Herrmann, H. (2022). Understanding aerosol composition in a tropical inter-Andean valley impacted by agro-industrial and urban emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(13), 8473–8495. <https://doi.org/10.5194/acp-22-8473-2022>
- MAVDT. (2010). Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. In *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Diseño.pdf
- Mesa-Sánchez, O. J., & Rojo-Hernández, J. D. (2020). On the general circulation of the atmosphere around Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(172), 857–875. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.899>
- Ministerio de Ambiente. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*.
- Nedbor-Gross, R., Henderson, B. H., Davis, J. R., Pachón, J. E., Rincón, A., Guerrero, O. J., & Grajales, F. (2017). Comparing standard to feature-based meteorological model evaluation techniques in Bogotá, Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 391–413. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0058.1>
- Pérez, I. A., García, M. Á., Sánchez, M. L., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2020). Key points in air pollution meteorology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. In *Atmospheric Chemistry and Physics*. Wiley. <https://doi.org/10.5194/acp-5-139-2005>
- Stirnberg, R., Cermak, J., Kotthaus, S., Haeffelin, M., Andersen, H., Fuchs, J., Kim, M., Petit, J. E., & Favez, O. (2021). Meteorology-driven variability of air pollution (PM₁) revealed with explainable machine learning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(5), 3919–3948. <https://doi.org/10.5194/acp-21-3919-2021>
- Tuccella, P., Curci, G., Grell, G. A., Visconti, G., Crumeyrolle, S., Schwarzenboeck, A., & Mensah, A. A. (2015). A new chemistry option in WRF-Chem v. 3.4 for the simulation of direct and indirect aerosol effects using VBS: Evaluation against IMPACT-EUCAARI data. *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2749–2776. <https://doi.org/10.5194/GMD-8-2749-2015>
- Wang, X., Wu, Z., & Liang, G. (2009). WRF/CHEM modeling of impacts of weather conditions modified by urban expansion on secondary organic aerosol formation over Pearl River Delta. *Particuology*, 7(5), 384–391. <https://doi.org/10.1016/J.PARTIC.2009.04.007>
- WHO. (2021). WHO's global air-quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. In *Lancet* (Vol. 368, Issue

9544).

- Williams, R., Kilaru, V. J., Snyder, E. G., Kaufman, A., Dye, T., Rutter, A., Russell, A., & Hafner, H. (2014). Air Sensor Guidebook. *Epa/600/R-14/159*, 1, 1–5.
- Xing, L., Wu, J., Elser, M., Tong, S., Liu, S., Li, X., Liu, L., Cao, J., Zhou, J., El-Haddad, I., Huang, R., Ge, M., Tie, X., Prévôt, A. S. H., & Li, G. (2019). Wintertime secondary organic aerosol formation in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH): Contributions of HONO sources and heterogeneous reactions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(4), 2343–2359. <https://doi.org/10.5194/ACP-19-2343-2019>
- Yepes, J., Poveda, G., Mejía, J. F., Moreno, L., & Rueda, C. (2019). Choco-jex: A research experiment focused on the Chocó low-level jet over the far eastern Pacific and western Colombia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(5), 779–796. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0045.1>
- Zhang, Y., Chen, Y., Sarwar, G., & Schere, K. (2012). Impact of gas-phase mechanisms on Weather Research Forecasting Model with Chemistry (WRF/Chem) predictions: Mechanism implementation and comparative evaluation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117, D01301. <https://doi.org/10.1029/2011JD015775>
- Zhou, W., Gao, M., He, Y., Wang, Q., Xie, C., Xu, W., Zhao, J., Du, W., Qiu, Y., Lei, L., Fu, P., Wang, Z., Worsnop, D. R., Zhang, Q., & Sun, Y. (2019). Response of aerosol chemistry to clean air action in Beijing, China: Insights from two-year ACSM measurements and model simulations. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 255(Pt 2). <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.113345>