



Autoridad Nacional
de Licencias Ambientales

MAYO
2026

INFORME DEL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES:

***ESTRATEGIA DE MONITOREO DEL
COMPONENTE ATMOSFÉRICO:
ZONA MINERA DEL CENTRO DEL CESAR
(2021 – 2025)***

Irene Vélez Torres
Director General

Jorge Alberto Sanabria Morales
Subdirector Instrumentos Permisos y Trámites Ambientales

Oscar Alexander Varila Quiroga
Coordinador
Grupo de Regionalización
y Centro de Monitoreo

Juliana Andrea Torres Cely
Líder
Implementación Regional

Luisa Fernanda Valencia Casas
Lizeth Bibiana Castro Olivares
Líderes
Centro de Monitoreo de los Recursos Naturales

Juan Pablo Ayala Robayo
Líder
Componente Atmosférico

Neidy Mildred Daza Lesmes
Javier Beltrán Maldonado
Jaime Andrés Fajardo Rodríguez
William Alfredo Pabón Botello
German Leonardo Figueroa Pulido
Profesionales
Componente Atmosférico



CONTENIDO

1. GLOSARIO (SIGLAS)	6
2. INTRODUCCIÓN	7
3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO	8
3.1. CONDICIONES DE LUGAR	9
3.2. CONDICIONES DE TIEMPO	10
3.3. CONDICIONES DE MODO	11
4. ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE	12
4.1. INFORMACIÓN ANALIZADA	12
4.1.1. MUESTRAS VÁLIDAS DE LOS SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE FIJOS (SVCAI)	13
4.2. RESULTADOS	14
4.2.1. Análisis históricos de material particulado	14
4.2.2. Comportamiento de la velocidad y de la dirección del viento	26
4.2.3. Análisis conjunto de concentraciones de material particulado con el comportamiento del viento	27
4.2.4. Análisis de ciclos temporales	31
4.2.5. Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA	33
4.2.5.1. ICA - Material particulado PM ₁₀	34
4.2.5.2. ICA - Material particulado PM _{2.5}	36
4.2.6. Actuaciones judiciales y procesos sancionatorios asociados al componente atmosférico en el área de la estrategia de monitoreo	38
4.3. MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM ₁₀ Y PM _{2.5}	39
4.3.1. Parametrización	39
4.3.2. Resultados	41
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
6. BIBLIOGRAFÍA	56
7. ANEXOS	57
7.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA ESTACIÓN DE MONITOREO DEL AÑO 2025	57
7.1.1. Expediente LAM0027	57
7.1.2. Expediente LAM2622	58
7.1.3. Expediente LAM3271	59



7.1.4.	SEVCA ZMC – CORPOCESAR: PM10	60
7.1.5.	SEVCA ZMC – CORPOCESAR: PM2.5	61

TABLAS

Tabla 1. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire)	7
Tabla 2. Proyectos en la ZMCC con obligaciones asociadas a la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire) de la ANLA.....	8
Tabla 3. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire).....	9
Tabla 4. Disponibilidad de información de las estaciones de los SVCAI Fijos para la ZMCC ..	12
Tabla 5. Cantidad de registros diarios de calidad del aire para la Zona Minera del Centro del Cesar (ZMCC)	13
Tabla 6. Descripción general del Índice de Calidad del Aire.....	34
Tabla 7. Proyectos incluidos en modelación de La Zona Minera del Cesar	39
Tabla 8. Estadísticos Concentraciones anuales sobre receptores discretos – Escenario Actual	41
Tabla 9. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM ₁₀	45
Tabla 10. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM _{2.5}	46

FIGURAS

Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de análisis (ZMCC) y del SEVCA ZMC de CORPOCESAR.	10
Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM ₁₀	15
Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM _{2.5}	16
Figura 4. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM _{2.5}	17
Figura 5. Comportamiento histórico de promedios mensuales de PM ₁₀	18
Figura 6. Comportamiento histórico de promedios mensuales de PM _{2.5}	20
Figura 7. Distribución de los promedios diarios de PM ₁₀	22
Figura 8. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM ₁₀	23
Figura 9. Distribución de promedios diarios de PM _{2.5}	24
Figura 10. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM _{2.5}	25
Figura 11. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2024.....	27
Figura 12. Gráficos polares anulares para las estaciones de calidad del aire (PM ₁₀) en 2024..	28
Figura 13. Gráficos polares anulares para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2024 .	29
Figura 14. Gráficos polares para las estaciones de calidad del aire (PM ₁₀) en 2024.....	30
Figura 15. Gráficos polares para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2024	31
Figura 16. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire en 2025.	33
Figura 17. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM ₁₀	35
Figura 18. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM _{2.5}	37
Figura 19. Comparación entre concentraciones modeladas y medidas de PM ₁₀ y PM _{2.5} en receptores sensibles.....	42



Figura 20. Relación de aporte estaciones de monitoreo regional de PM_{10} : Concentración ($\mu g/m^3$) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.	44
Figura 21. Isopleta de PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Tiempo de exposición anual para la ZMCC (año 2023)...	48
Figura 23. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM_{10} – SEVCA ZMC CORPOCESAR	60
Figura 24. Índices de calidad del aire de 2025 ICA $PM_{2.5}$ – SEVCA ZMC CORPOCESAR.....	61



1. GLOSARIO (SIGLAS)

Para efectos del presente documento, se adoptan las siguientes siglas:

ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.

CMRN: Centro de Monitoreo de los Recursos Naturales.

CMT-12: Sistema de coordenadas del Origen Nacional (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia).

CORPOCESAR: Corporación Autónoma Regional del Cesar.

DBSCAN: Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (algoritmo de agrupamiento espacial).

EIAc: Evaluación de Impactos Acumulativos.

EM: Estrategia de Monitoreo.

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos).

ICA: Índice de Calidad del Aire.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (denominación anterior del MADS).

PM₁₀: Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros.

PM_{2.5}: Material particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros.

POA: Proyectos, Obras o Actividades.

RMSE: Root Mean Square Error (Error Cuadrático Medio).

SEVCA: Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire.

SILA: Sistema de Información de Licencias Ambientales.

SIPTA: Subdirección de Instrumentos, Permisos y Trámites Ambientales de la ANLA.

SISAIRE: Subsistema de Información sobre Calidad del Aire.

SVCA / SVCAI: Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire.

WRF: Weather Research and Forecasting Model (modelo meteorológico).

ZMCC: Zona Minera del Centro del Cesar.



2. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de evaluar el estado de la calidad del aire en la **Zona Minera del Centro del Cesar**, este documento presenta el análisis de las concentraciones del periodo 2021 a 2025, de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). Para lo anterior, se consideraron los registros históricos reportados por los Proyectos, Obras o Actividades (POA) que se encuentran reportando a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), bajo la **estrategia de monitoreo del componente atmosférico**. Adicionalmente, se integran y consideran los resultados de los registros provenientes de las estaciones de monitoreo de calidad del aire asociadas al Sistema de Vigilancia Especial de la Corporación Autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR (SEVCA-ZMC), con el propósito de ampliar la base de información para fortalecer el análisis, garantizando una mayor representatividad espacial y temporal de las condiciones atmosféricas en la zona de influencia.

Los datos históricos de la calidad del aire concerniente a los proyectos con **Estrategia de Monitoreo Atmosférica de la Zona Minera del Centro del Cesar**, considerados en este análisis se enmarcaron en el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2021 al 31 de diciembre del 2025 para los proyectos listados en Tabla 1. De otra parte, los asociados a CORPOCESAR se obtuvieron por medio del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) del IDEAM para el periodo de análisis desde 2021 hasta 2025.

Tabla 1. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire)

#	EXPEDIENTE	MINA
1	LAM0027	La Loma Pribbenow
2	LAM1869	El Hatillo
3	LAM2622	Calenturitas
4	LAM3199	La Francia
5	LAM3271	Descanso Norte

Fuente: ANLA SIPTA, 2026.



3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO

Las estrategias de monitoreo regional de los recursos naturales de la ANLA tienen como objetivo optimizar el seguimiento de los proyectos objeto de licenciamiento ambiental y el proceso de Evaluación de Impactos Acumulativos (EIAc), a través del fortalecimiento del monitoreo regional. Los lineamientos y estándares formulados para cada componente están estructurados mediante condiciones de tiempo, modo y lugar.

Para el componente atmosférico, se encuentran implementadas cuatro (4) estrategias de monitoreo, denominadas: La Guajira, Corredor Portuario de Santa Marta, Alto San Jorge y Zona Minera del Centro del Cesar, las cuales abarcan un total de 18 proyectos con obligaciones asociadas al monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

En particular, la estrategia de monitoreo de la Zona Minera del Centro del Cesar (en adelante, ZMCC) contempla obligaciones y/o medidas dirigidas principalmente a los proyectos con actividades asociadas a la minería de carbón, los cuales fueron seleccionados en función de su potencial de impacto sobre los niveles de inmisión de la calidad del aire, especialmente en relación con material particulado. Es importante señalar que, dentro de la misma zona, existen operaciones de otros sectores que actualmente no hacen parte de esta estrategia de monitoreo, debido a que su contribución potencial a la alteración de la calidad del aire se considera comparativamente menor.

A continuación, se relacionan los proyectos asociados a la estrategia objeto de análisis.

Tabla 2. Proyectos en la ZMCC con obligaciones asociadas a la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire) de la ANLA

EXPEDIENTE	EMPRESA	MINA	MUNICIPIO
LAM0027	Drummond Ltda.	La Loma Pribbenow	El Paso, Chiriguaná y La Jagua de Ibirico.
LAM2622	C.I. Prodeco S.A.	Calenturitas	El Paso, Becerril y La Jagua de Ibirico.
LAM3199	C.L. Colombian Natural Resources I S.A.S.	La Francia	Becerril y El Paso.
LAM3271	Drummond Ltda.	Descanso Norte	Becerril y Agustín Codazzi
LAM3831	Norcarbon S.A.	Cerrolargo	La Jagua de Ibirico
LAM1862	COLOMBIAN NATURAL RESOURCES CNR III LTD. Sucursal Colombia.	El Hatillo	El Paso (Corregimiento De La Loma), Chiriguaná y La Jagua de Ibirico.

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales.

Los proyectos asociados a la estrategia de monitoreo de la ZMCC mantienen las siguientes condiciones de modo, tiempo y lugar para el monitoreo de la calidad del aire.



3.1. CONDICIONES DE LUGAR

En la Tabla 3 se relacionan las coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo de cada uno de los proyectos que se encuentran reportando resultados en el marco de la estrategia y en la Figura 1, se presenta la localización y la distribución espacial. Adicionalmente, a continuación, se precisan las novedades que se han presentado frente a la localización de las estaciones de ciertos proyectos.

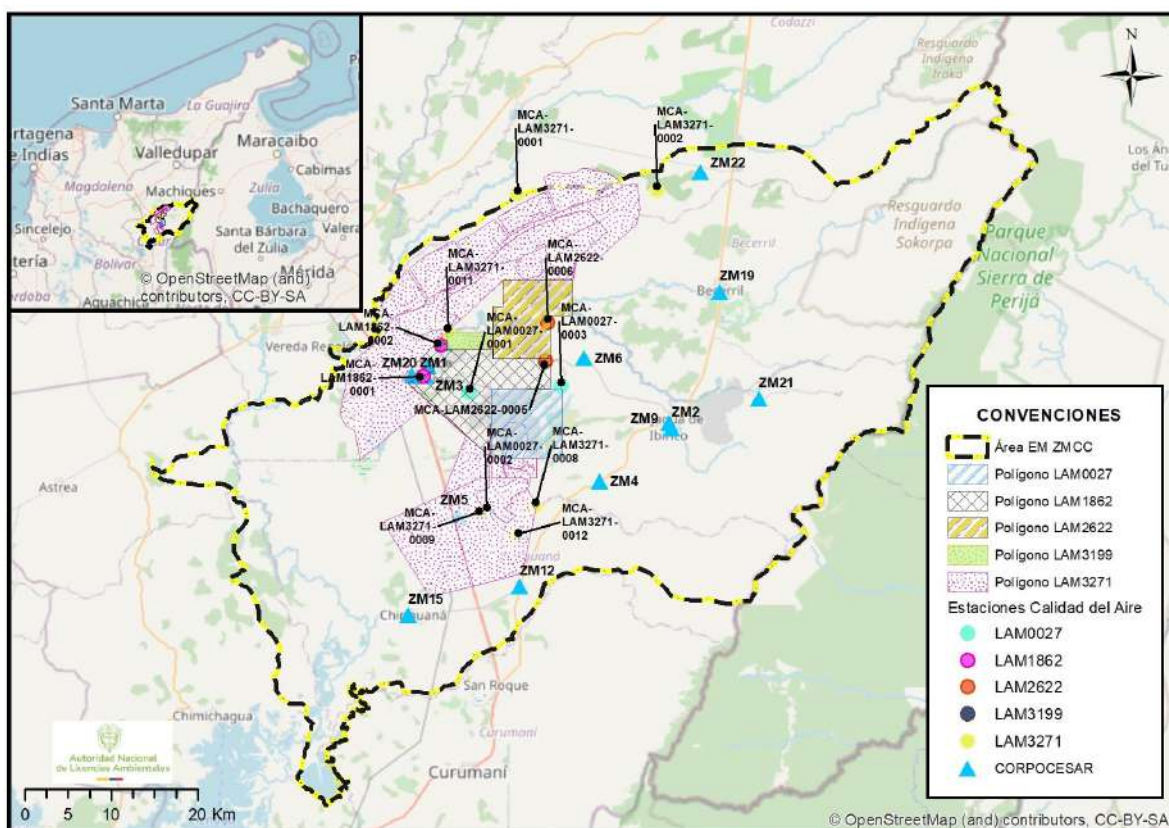
- Por medio de Artículo Primero de la Resolución 622 del 3 de marzo de 2026 se actualizó la codificación de las estaciones de monitoreo del LAM3271.
- Por medio del Artículo Primero de la Resolución 1650 del 15 de agosto de 2025 se actualizó la localización de la estación MCA-LAM3199-001 del LAM3199.

Tabla 3. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica (calidad del aire)

SVCA	CODIFICACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	COORDENADAS ORIGEN ÚNICO NACIONAL	
			ESTE	NORTE
LAM0027	MCA-LAM0027-0001	La Loma	4940388,80	2618445,20
	MCA-LAM0027-0002	La Aurora	4942463,90	2604672,50
	MCA-LAM0027-0003	Boquerón	4951050,90	2619166,60
LAM1862	MCA-LAM1862-0001	BotHati_1, hacia la Loma (A8)	4935164,74	2620318,57
	MCA-LAM1862-0002	BotHati_2, hacia El Hatillo (A9)	4937222,43	2623965,94
LAM2622	MCA-LAM2622-0005	Predios Dispersos	4949266,20	2622103,70
	MCA-LAM2622-0006	El Prado	4949515,10	2626510,30
LAM3199	MCA-LAM3199- 0001	Palmeras de Alamosa	4938617,96	2625524,52
	MCA-LAM3199- 0002	Casino	4942801,58	2624179,35
LAM3271	MCA-LAM3271- 0001	EDN Fondo	4946040,60	2641406,70
	MCA-LAM3271- 0002	Dirección a Becerril	4962136,20	2641835,20
	MCA-LAM3271- 0008	Dirección a Arenas Blancas	4948000,20	2605275,90
	MCA-LAM3271- 0009	Dirección a La Aurora	4942019,90	2604858,80
	MCA-LAM3271- 0011	Dirección a El Hatillo	4937986,30	2625408,30
	MCA-LAM3271- 0012	Dirección a Rincón Hondo	4945683,10	2602032,10
CORPOCESAR ¹	ZM01	La Loma Centro	4933840,78	2620417,89
	ZM02	La Jagua Centro	4963833,03	2614342,80
	ZM03	La Loma 2	4935354,42	2620415,25
	ZM04	La Palmita	4955521,72	2608239,95
	ZM05	La Aurora	4939174,69	2604214,41
	ZM06	Boqueron	4953727,00	2622481,91
	ZM09	La Jagua Vía	4963515,56	2615017,26
	ZM12	Rincón Hondo	4946244,52	2596072,64
	ZM13	El Hatillo	4937488,67	2624246,78
	ZM15	Chiriguana	4933364,65	2592732,91
	ZM19	Becerril	4969385,62	2630119,90
	ZM20	Costa Hermosa	4935686,52	2621482,76
	ZM21	La Victoria	4973934,24	2617749,18
	ZM22	Casacará	4967147,66	2644012,85

Fuente: ANLA SIPTA, 2026.

¹ Las estaciones ZM13 y ZM20 bajo la Resolución 0071 de 2021 eran catalogadas como áreas-fuente de contaminación atmosférica alta (Clase I) por material particulado PM10. Sin embargo, por medio de la Resolución 858 de 2026 fueron derogadas, ya que no cumplen con las condiciones técnicas que originaron su clasificación inicial.



Fuente: ANLA SIPTA, 2026.

Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de análisis (ZMCC) y del SEVCA ZMC de CORPOCESAR.

3.2. CONDICIONES DE TIEMPO

Frecuencia de muestreo:

- Equipos con tecnología de medición manual para PM_{10} y $PM_{2.5}$ deben tener una periodicidad de muestreo cada tercer día, de acuerdo con el cronograma del SEVCA de CORPOCESAR.
- Equipos con tecnología automática deben tener una periodicidad de muestreo horaria, según las especificaciones técnicas correspondientes a cada estación.

Lo anterior, conforme a lo establecido en el Manual del Diseño del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad de Aire, adoptado mediante Resolución No. 650 de 2010² y ajustado por la Resolución No. 2154 de 2010³, o aquellas que las modifiquen o sustituyan.

² Resolución 650 de 2010: "Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire".

³ Resolución 2154 de 2010: "Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones"



Radicación de la información: ante la ANLA se radican las mediciones validadas (contaminantes y variables meteorológicas) de las estaciones de SEVCA a través del Portal de Recepción de información – AGIL, utilizando el Módulo Atmosférico. Para ello, cada proyecto en cabeza de su sociedad cuenta con un usuario único.

Frecuencia de radicación de la información:

- Estaciones automáticas deben radicar semanalmente.
- Estaciones manuales deben radicar mensualmente.

Reporte a SISAIRE: Sin perjuicio de lo anterior, y en línea con lo establecido en el Artículo 25 de la Resolución No. 2254 de 2017⁴, la información del estado de la calidad del aire deberá migrarse también al Subsistema de Información sobre la Calidad del Aire (SISAIRE), conforme a los tiempos de reporte establecidos en el Artículo Quinto de la Resolución 651 de 2010⁵.

3.3. CONDICIONES DE MODO

Contaminantes y parámetros: medición de concentraciones de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, a condiciones de referencia y en µg/m³; y parámetros meteorológicos, tales como: temperatura del aire (°C), presión atmosférica (bar), humedad relativa (%), radiación solar (W/m²), precipitación (mm), velocidad (m/s) y dirección del viento (°).

Metodología: las mediciones de concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} se llevarán a cabo utilizando equipos con métodos acreditados por IDEAM, en cumplimiento de lo establecido en el artículo 2.2.8.9.1.5 del Decreto 1076 de 2015.

⁴ Resolución 2254 de 2017: "Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones"

⁵ Resolución 651 de 2010: "Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRE".



4. ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE

4.1. INFORMACIÓN ANALIZADA

A continuación, se presenta un resumen de la información disponible para el análisis del cumplimiento de las obligaciones relacionadas con la estrategia de monitoreo regional para el periodo de 2021 a 2025. Esta información ha sido obtenida del Módulo Atmosférico del Portal de Recepción de Información de la ANLA y del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) del IDEAM, específicamente para el caso de las estaciones bajo la jurisdicción de CORPOCESAR (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Disponibilidad de información de las estaciones de los SVCAI Fijos para la ZMCC

SVCA	CODIFICACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	PERIODO DE REPORTE	
			Fecha Inicial	Fecha Final
LAM0027	MCA-LAM0027-0001	La Loma	01/01/2023	31/12/2025
	MCA-LAM0027-0002	La Aurora	01/01/2023	31/12/2025
	MCA-LAM0027-0003	Boquerón	01/01/2023	31/12/2025
LAM1862	MCA-LAM1862-0001	BotHati_1, hacia la Loma (A8)	01/12/2024	30/11/2025
	MCA-LAM1862-0002	BotHati_2, hacia El Hatillo (A9)	01/12/2024	31/12/2025
LAM2622	MCA-LAM2622-0005	Predios Dispersos	01/01/2023	31/12/2025
	MCA-LAM2622-0006	El Prado	04/01/2023	31/12/2025
LAM3199	MCA-LAM3199- 0001	Palmeras de Alamosa	03/11/2024	31/12/2025
	MCA-LAM3199- 0002	Casino	01/11/2024	31/12/2025
LAM3271	MCA-LAM3271- 0001	EDN Fondo	01/01/2023	31/12/2025
	MCA-LAM3271- 0002	Dirección a Becerril	01/01/2023	14/12/2025
	MCA-LAM3271- 0008	Dirección a Arenas Blancas	23/01/2023	14/12/2025
	MCA-LAM3271- 0009	Dirección a La Aurora	23/01/2023	14/12/2025
	MCA-LAM3271- 0011	Dirección a El Hatillo	01/01/2023	14/12/2025
	MCA-LAM3271- 0012	Dirección a Rincón Hondo	23/01/2023	14/12/2025
CORPOCESAR	ZM01	La Loma Centro	01/01/2021	31/12/2025
	ZM02	La Jagua Centro	01/01/2021	31/12/2025
	ZM03	La Loma 2	01/01/2021	31/12/2025
	ZM04	La Palmita	01/01/2021	31/12/2025
	ZM05	La Aurora	01/01/2021	31/12/2025
	ZM06	Boquerón	01/01/2021	31/12/2025
	ZM09	La Jagua Vía	01/01/2021	31/12/2025
	ZM12	Rincón Hondo	01/01/2021	31/12/2025
	ZM13	El Hatillo	01/01/2021	31/12/2025
	ZM15	Chiriguana	01/01/2021	31/12/2025
	ZM19	Becerril	01/01/2021	31/12/2025
	ZM20	Costa Hermosa	01/01/2021	31/12/2025
	ZM21	La Victoria	01/01/2021	31/12/2025
	ZM22	Casacará	01/01/2021	31/12/2025

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, 2026



4.1.1. MUESTRAS VÁLIDAS DE LOS SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE FIJOS (SVCAI)

De acuerdo con la información correspondiente a las estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en la zona de implementación de la estrategia, presentada en la Figura 1 y Tabla 3, a continuación, se analizan los resultados de concentración de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, así como las variables meteorológicas asociadas a dichas mediciones.

Frente al consolidado total anual (Tabla 5) teniendo en cuenta que se trata de sistemas fijos que monitorean de manera permanente, la representatividad temporal de los registros se calcula con base en el número máximo de datos posibles durante el año de evaluación. Se considera que existe cumplimiento normativo cuando la cobertura de datos supera el 75% del total esperable para el periodo evaluado.

Tabla 5. Cantidad de registros diarios de calidad del aire para la Zona Minera del Centro del Cesar (ZMCC)

EXPEDIENTE/ CORPORACIÓN	AÑO	PM ₁₀		PM _{2.5}	
		# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)	# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)
CORPOCESAR	2021	14	35 – 100	10	35 – 98
	2022	14	82 – 98	9	25 – 98
	2023	14	98 – 100	8	8 – 100
	2024	14	97 – 100	7	66 – 100
	2025	14	55 – 100	4	55 – 100
LAM0027	2023	3	92	3	92
	2024	3	98	3	98
	2025	3	100	3	100
LAM1862	2024	2	8 – 16	2	8 – 16
	2025	2	91 – 92	2	91 – 92
LAM2622	2023	2	89	2	87 – 89
	2024	2	96 – 97	2	99
	2025	2	94 – 98	2	96 – 97
LAM3199	2024	2	16	2	16
	2025	2	77 – 85	2	77 – 85
LAM3271	2023	6	90 – 96	6	90 – 96
	2024	6	47 – 10	6	47 – 62
	2025	6	95 – 98	6	95 – 100

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

La información anterior, muestra la representación temporal de los datos de los muestreos para material particulado. Así las cosas, conforme a esta se evidencia la variabilidad y el análisis de cumplimiento ocurre para aquellas estaciones que superan el 75% de representatividad conforme a lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010 hoy MADS), para los años analizados. Cabe precisar que, para proyectos como el LAM1862 y el LAM3199 en 2024 obtuvieron un porcentaje inferior



considerando que iniciaron operación del SVCAI en diciembre y noviembre, respectivamente. Por tanto, no alcanzaban registros superiores.

Según los datos procesados, se determina que la representatividad temporal de los proyectos a cargo de la ANLA presenta resultados superiores a 75% para los años 2022 al 2025, a excepción del LAM3271, el cual para 2024 tuvo una representatividad del 47% en la estación MCA-LAM3271-0011y del 67% para MCA-LAM3271-0012. Cabe precisar que, para este último proyecto, las justificaciones asociadas a la cantidad de registros analizados y válidos se encontrarán en el apartado de resultados. De otra parte, para el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de CORPOCESAR, se registró representatividades anuales que oscilan entre 8% y el 100% en un periodo de análisis que cubre desde los años 2021 al 2025, en 14 estaciones de monitoreo dependiendo del parámetro. Conforme a esto, se evidencia que algunas estaciones no logran el porcentaje de validez de captura de información. Lo anterior, asociado al tiempo de arranque del monitoreo o posibles salidas de funcionamiento de los equipos. Aun así, la mayoría de las estaciones cumplen con el criterio antes mencionado, lo que permite hacer los respectivos análisis de resultados. Así mismo, se debe resaltar que, para los últimos cinco (5) años la captura y validez de los datos han tenido mayor representatividad.

4.2. RESULTADOS

4.2.1. Análisis históricos de material particulado

En el presente apartado se identificará el análisis histórico del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, para los periodos anual, mensual y diario.

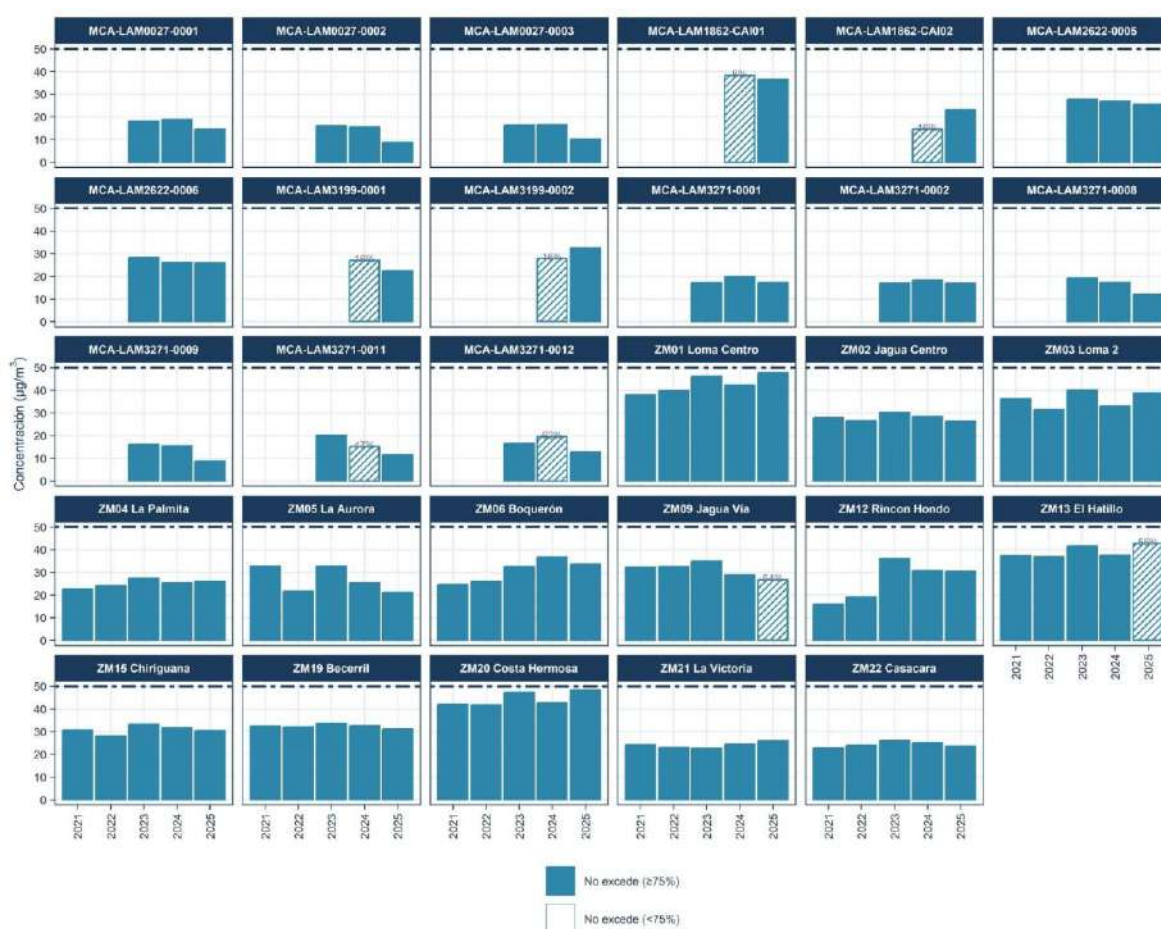
Análisis de resultados de PM_{10} : considerando los resultados presentados en la Figura 2, se observa que, en términos generales, ninguna de las estaciones superó el valor límite anual de $50 \mu g/m^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017. No obstante, se identifican concentraciones cercanas a este umbral, para el caso de las estaciones de CORPOCESAR ZM01 Loma Centro, ZM03 La Loma, ZM13 El Hatillo y ZM20 Costa Hermosa. Lo anterior, sugiere la necesidad de atención preventiva considerando que para el año 2030 el límite en tiempo de exposición anual para PM_{10} , establecido por el artículo 3 de la norma antes referida, será de $30 \mu g/m^3$.

Al diferenciar entre estaciones asociadas a proyectos con estrategia de monitoreo de la ANLA (MCA-LAM) y estaciones de monitoreo de CORPOCESAR (ZM), se evidencia que las primeras presentan concentraciones generalmente más bajas, en un rango aproximado de 10 a $35 \mu g/m^3$, con comportamientos relativamente estables o con variaciones interanuales moderadas. En contraste, como se mencionó anteriormente, las estaciones de CORPOCESAR registran concentraciones más elevadas, atribuibles a su carácter integrador de múltiples fuentes de emisión. Específicamente, las estaciones: ZM01 Loma Centro, ZM03 La Loma, ZM13 El Hatillo y ZM20 Costa Hermosa; y de proyectos de la ANLA la estación MCA-LAM1862-0001 (CA01) del LAM1862, presentan valores cercanos al límite normativo. En particular, las



estaciones de CORPOCESAR reflejan condiciones de mayor presión ambiental asociadas a la acumulación de emisiones teniendo en cuenta que según el informe anual de operación del SVCA para el año 2025 (CORPOCESAR, 2026), ZM01 y ZM03 son estaciones de fondo urbano, ZM13 y ZM20 están asociadas a tráfico. Estas condiciones sugieren la necesidad de profundizar en el análisis de contribución de fuentes emisoras en dichas zonas; y de fortalecer el seguimiento de la efectividad de las medidas de manejo implementadas cuando se trate de proyectos ANLA.

El análisis temporal interanual no evidencia una tendencia de resultados uniforme en el conjunto de estaciones. Se identifican comportamientos diferenciados, ya que las estaciones asociadas a los proyectos ANLA presentan una leve disminución en las concentraciones, asociada posiblemente a la implementación de medidas de control.



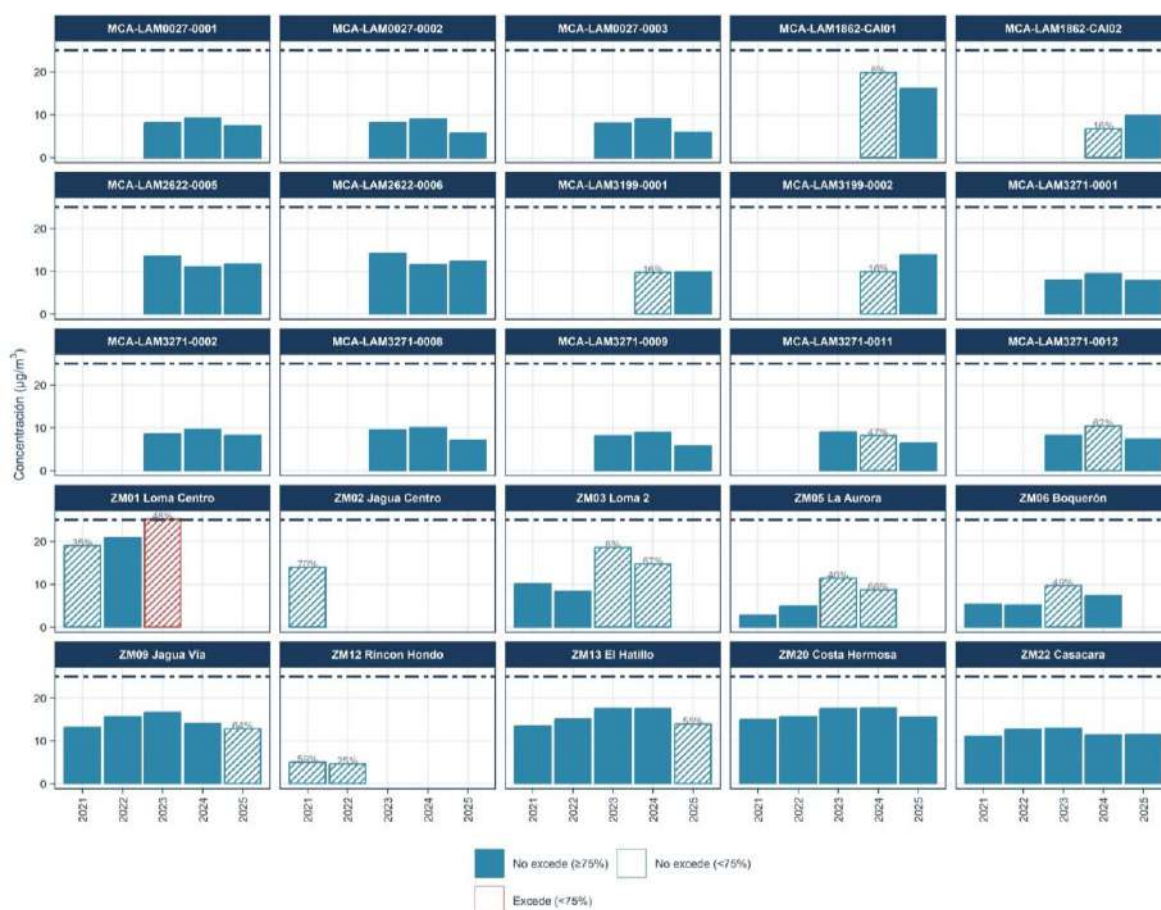
Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM₁₀

Análisis de resultados de PM_{2.5}: considerando los resultados presentados en la Figura 3, se observa que, en la totalidad de las estaciones evaluadas se mantienen registros por debajo del valor límite anual de 25 µg/m³ establecido en la Resolución 2254 de 2017, a excepción de la estación de CORPOCESAR ZM01 Loma Centro para el año 2023, valor que para ese año y

estación estuvo influenciado por eventos como “cortinas de material particulado”, “incendios forestales” y una condición atípica de “Incendio en Mina el Descanso” e “Incendio en bodega de combustible (CORPOCESAR, 2023).

Desde el punto de vista temporal, no se identifica una tendencia homogénea en el periodo analizado respecto a la totalidad de las estaciones localizadas en la ZMCC. Algunas estaciones evidencian incrementos progresivos hasta años recientes, seguidos de ligeras reducciones (ZM09, ZM13, ZM20, ZM22, MCA-LAM-0002, MCA-LAM-0008 y MCA-LAM-0009), las cuales para registros del SVCAI de CORPOCESAR, en los informes se determinó que se encuentran influenciadas, por eventos de quemas de residuos sólidos, incendios forestales, alto tráfico vehicular, obras civiles, actividades industriales en zonas próximas a las estaciones, así como por la variabilidad del clima con cambios de temperatura y escasez de precipitaciones. Mientras que las demás estaciones analizadas, mantienen un comportamiento estable o con fluctuaciones leves. Estas variaciones pueden estar asociadas a cambios en la intensidad de las actividades emisoras, condiciones meteorológicas que afectan la dispersión de contaminantes, así como a la implementación o variabilidad en la eficacia de las medidas de manejo ambiental.

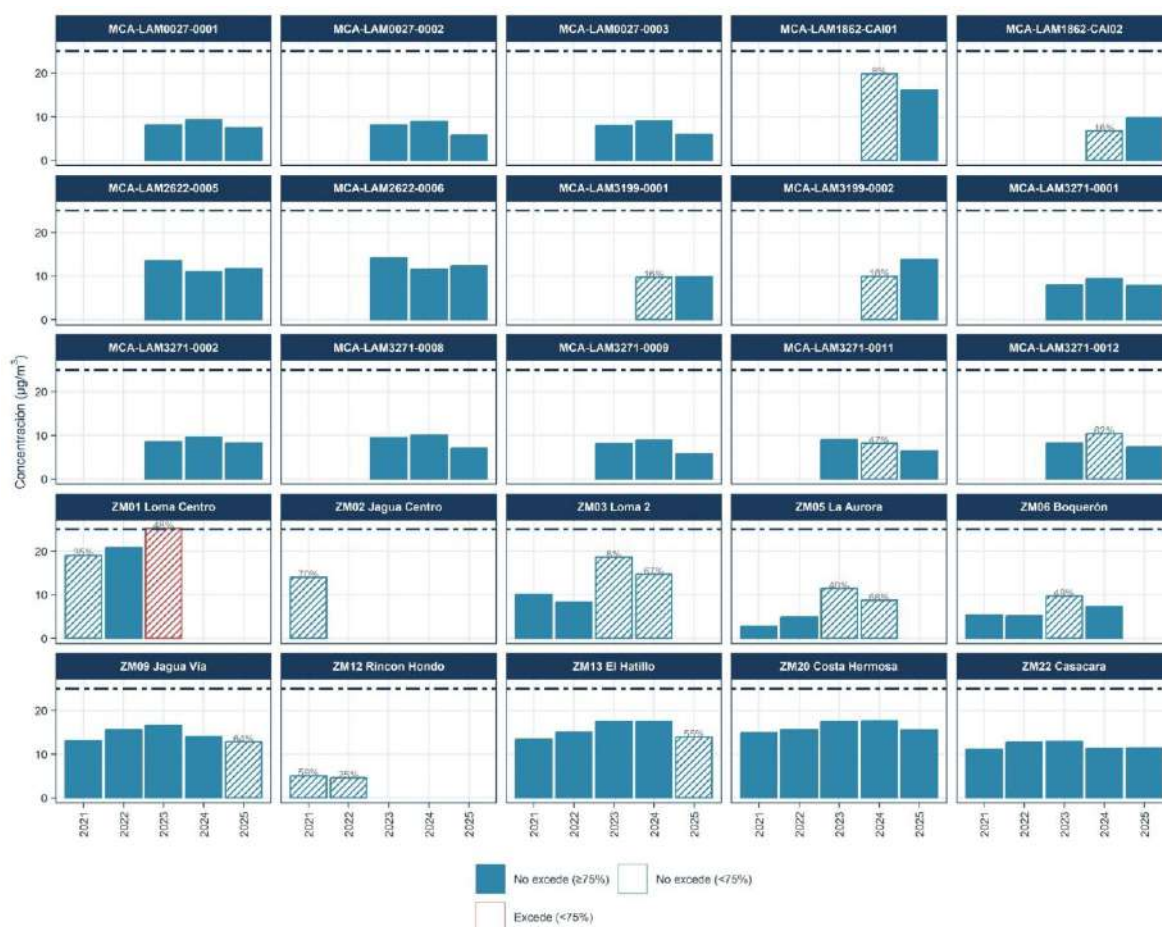


Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de $\text{PM}_{2.5}$



La interpretación técnica de estos resultados sugiere que el comportamiento del $PM_{2.5}$ (Figura 4) está influenciado tanto por fuentes locales como por aportes regionales, siendo particularmente relevante la contribución de fuentes difusas asociadas a actividades mineras, tránsito vehicular y procesos de resuspensión. A diferencia del PM_{10} , el $PM_{2.5}$ suele tener una mayor fracción de origen en procesos de combustión, lo que puede explicar su persistencia en el ambiente y su capacidad de transporte a mayores distancias, reflejada en los niveles observados en las estaciones regionales.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

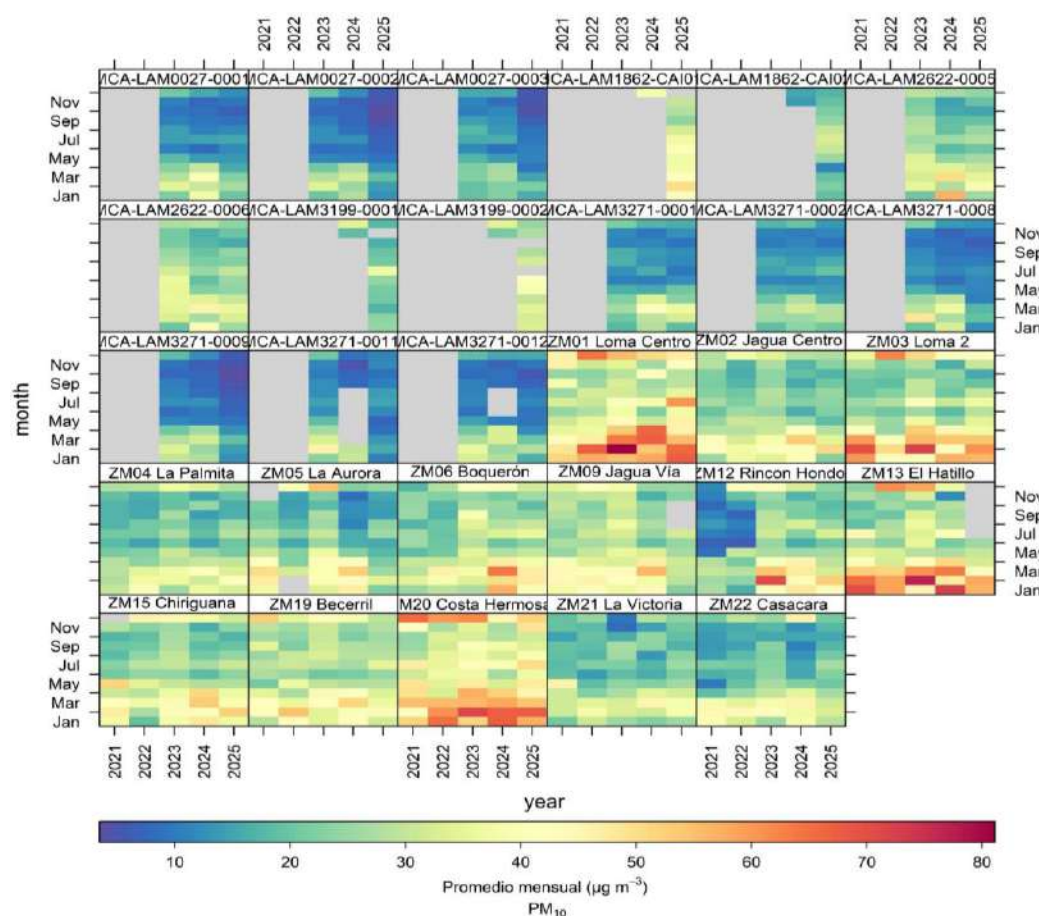
Figura 4. Comportamiento histórico de promedios anuales de $PM_{2.5}$

En relación con la tendencia de los resultados mensuales, a continuación, se presentan para cada estación los promedios históricos por mes.

El comportamiento mensual de las concentraciones de PM_{10} durante el periodo 2021–2025, representado en la Figura 5, permite identificar variaciones tanto interanuales como estacionales para las diferentes estaciones de monitoreo. En términos generales, se evidencia el cumplimiento del nivel máximo permisible anual de $50 \mu g/m^3$, establecido en la Resolución 2254 de 2017, sin que se registren excedencias sistemáticas en las estaciones.

No obstante, se identificaron episodios puntuales y atípicos con concentraciones elevadas, particularmente en las estaciones de monitoreo ZM01, ZM03, ZM12, ZM13 y ZM20 del SVCAI de CORPOCESAR, para el primer trimestre de cada año, alcanzando valores cercanos o superiores a $60\mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo anterior, sugiere condiciones temporales de mayor carga contaminante para los meses entre enero y marzo, asociados a época seca o estiaje. Sin embargo, dado que dichos eventos fueron aislados y no presentaron un comportamiento recurrente ni sistemático, no evidencian una tendencia persistente en la calidad del aire de la zona de estudio.

A nivel interanual, se observa que, para el periodo 2023 a 2025, las estaciones de los proyectos asociados a la estrategia de monitoreo mantienen concentraciones inferiores a los $50\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por el contrario, aquellas relacionadas al SVCAI de CORPOCESAR presentan concentraciones más elevadas, en especial durante los años 2023 y 2024 en comparación con 2021 y 2022, principalmente ZM01, ZM13 y ZM20, donde se evidencian picos recurrentes en los primeros meses del año; pese a eso, no se evidencian excedencias del límite normativo. Para el año 2025, en la mayoría de las estaciones se aprecia una ligera reducción o estabilización de las concentraciones mensuales.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

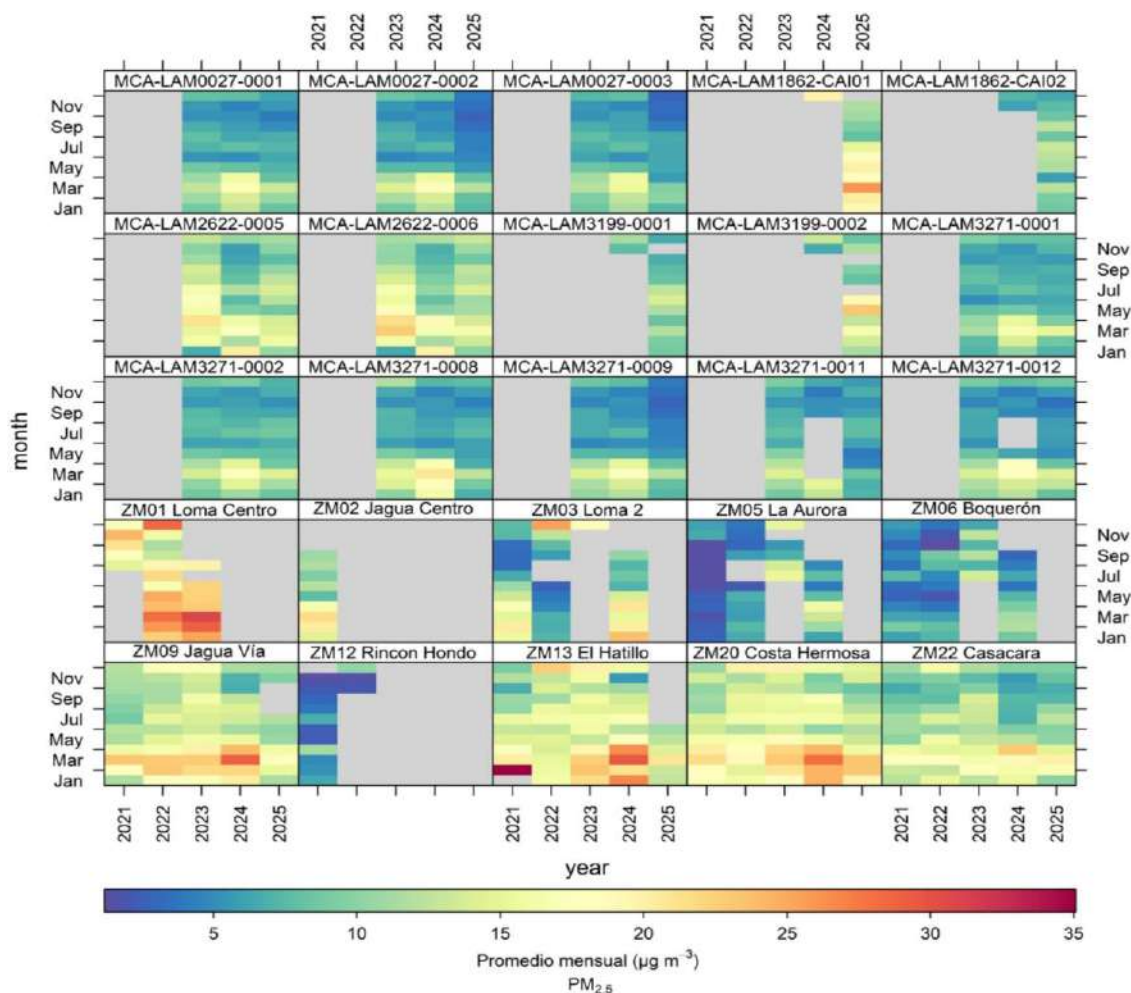
Figura 5. Comportamiento histórico de promedios mensuales de PM₁₀



Desde el punto de vista estacional, se identifica un patrón consistente en varias estaciones, caracterizado por concentraciones más altas durante los primeros meses del año (enero a marzo) y una disminución progresiva hacia el segundo semestre (julio a noviembre). Este comportamiento sugiere una fuerte influencia de las condiciones meteorológicas, particularmente asociadas a temporadas secas, en las cuales se incrementan los procesos de resuspensión de material particulado y disminuye el lavado atmosférico por precipitación. En contraste, durante los meses con mayor pluviosidad, se observa una reducción generalizada de las concentraciones.

En las estaciones asociadas a expedientes de la ANLA (MCA-LAM), el comportamiento mensual es más homogéneo y con menor amplitud en la variabilidad, evidenciando concentraciones moderadas y relativamente estables a lo largo del tiempo. Por el contrario, las estaciones de monitoreo regional (ZM) presentan una mayor variabilidad mensual y valores más elevados, reflejando el efecto acumulativo de múltiples fuentes de emisión, incluyendo actividades mineras, tránsito vehicular y posibles fuentes difusas.

En cuanto a la relación con el comportamiento del $PM_{2.5}$ (Figura 6), se observa una tendencia similar en términos de variabilidad temporal y estacionalidad, lo que sugiere que ambos contaminantes están influenciados por factores comunes, como la intensidad de las actividades emisoras y las condiciones meteorológicas regionales. No obstante, el PM_{10} presenta una mayor amplitud en sus concentraciones, lo cual es consistente con su mayor contribución por fuentes mecánicas y procesos de resuspensión.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 6. Comportamiento histórico de promedios mensuales de $PM_{2.5}$

Finalmente, es importante señalar la presencia de periodos sin información en algunas estaciones (representados como zonas grises en la Figura 6), particularmente en los primeros años del periodo analizado para varias estaciones de los proyectos de la ANLA (MCA-LAM) radican principalmente en la toma de los registros considerando la puesta en marcha de cada SVCAI (Tabla 4). En cualquier caso, es preciso acotar que las ausencias de datos pueden afectar la continuidad del análisis temporal y la representatividad de las tendencias identificadas, por lo que deben ser consideradas en la evaluación de la calidad de la información y en la interpretación de los resultados.

A continuación, se presenta el análisis de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ diarias (Figura 7 a la Figura 10), mediante el análisis de percentiles por medio de diagramas de caja.

El análisis de las concentraciones diarias de PM_{10} , para el periodo 2021–2025 (Figura 7 y Figura 8), permite evidenciar el comportamiento estadístico, la variabilidad interanual y la ocurrencia de episodios puntuales de alta concentración en cada una de las estaciones de



monitoreo evaluadas. En términos generales, las distribuciones muestran medianas relativamente estables a lo largo del tiempo en la mayoría de las estaciones, con ligeros incrementos en algunos periodos intermedios (principalmente entre 2022 y 2023). Estas dinámicas son consistentes con la variabilidad observada previamente en los análisis mensuales, y pueden estar asociadas tanto a condiciones meteorológicas como a cambios en la intensidad de las actividades emisoras en las áreas de influencia.

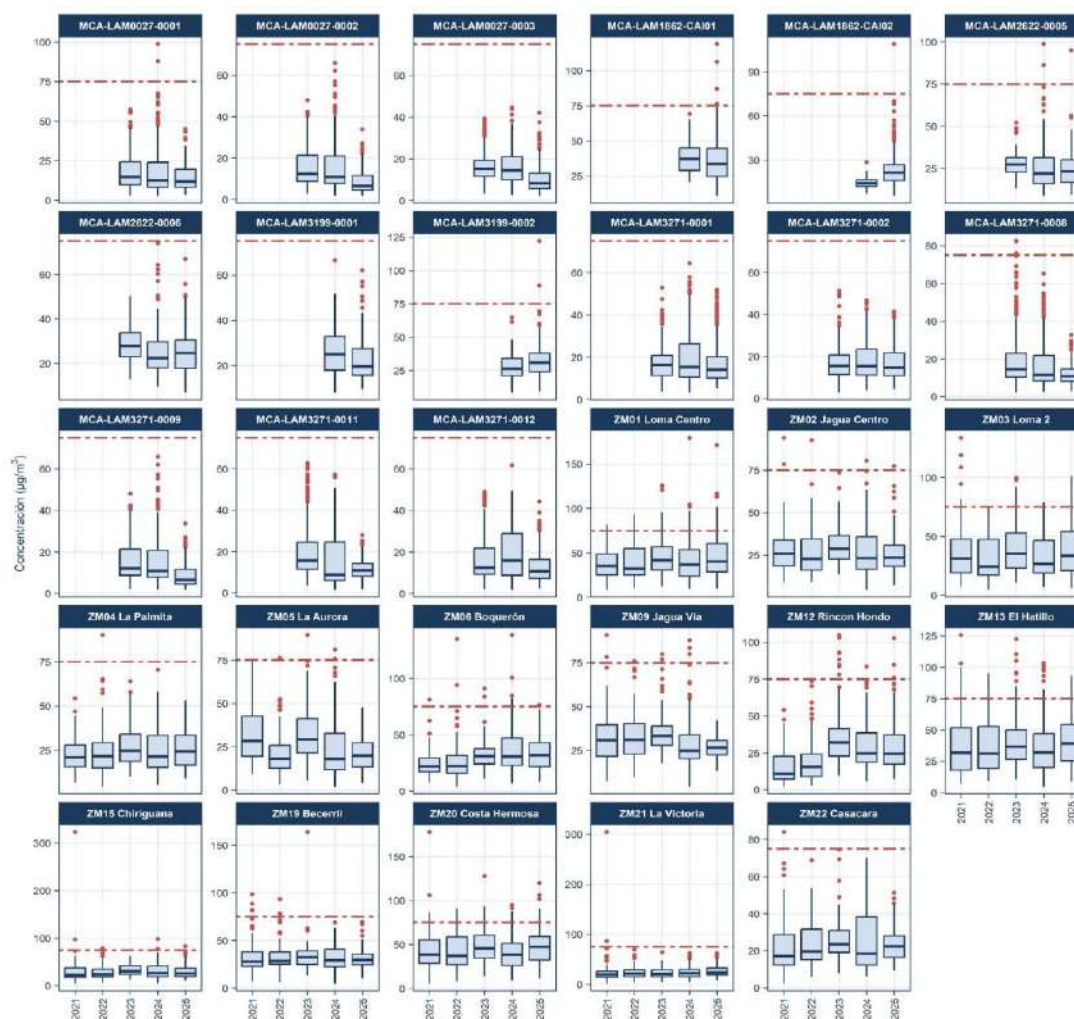
En relación con el cumplimiento normativo, la mayoría de las estaciones presentan medianas y rangos intercuartílicos por debajo del valor límite diario de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017 para tiempo de exposición diaria. No obstante, se identifican múltiples valores atípicos (outliers) que superan este umbral en estaciones del SVCAI de CORPOCESAR, principalmente en ZM01, ZM03, ZM09, ZM12, ZM15, ZM13, ZM19 y ZM20, donde incluso se evidencian eventos extremos que alcanzan concentraciones significativamente superiores a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e incluso cercanas o superiores a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ZM15). Estos eventos puntuales reflejan episodios críticos de calidad del aire que, aunque no son recurrentes en términos estadísticos, sí representan condiciones de exposición relevantes. Frente a esto, los informes anuales de operación de CORPOCESAR (2021-2025), referencian los siguientes eventos que aportan emisiones a la calidad del aire: quemas de residuos, uso de vías sin pavimentar, incendios forestales, quemas de residuos, aportes por actividad minera (transporte y voladuras), cortinas de polvo y desarrollo de obras civiles.

El análisis de las series de tiempo diarias permite evidenciar que, los picos de concentración no son continuos, sino que corresponden a eventos aislados o de corta duración. En la mayoría de las estaciones, las concentraciones se mantienen dentro de rangos moderados (entre 20 y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con incrementos abruptos en días específicos. Este comportamiento sugiere la influencia de factores episódicos, tales como condiciones meteorológicas adversas para la dispersión, eventos de resuspensión intensa, actividades operativas específicas o incluso fenómenos regionales como transporte de polvo o incendios, como los referenciados anteriormente.

En cuanto a la comparación entre tipos de estaciones, se observa que las estaciones de CORPOCESAR presentan una mayor dispersión en los datos, mayores rangos intercuartílicos y una mayor frecuencia de valores atípicos, reflejando el efecto acumulativo de múltiples fuentes y condiciones regionales, lo que explica su mayor variabilidad. En comparación con las estaciones asociadas a los expedientes de la ANLA (MCA-LAM), las cuales registraron distribuciones más compactas y concentraciones generalmente más bajas, lo cual indica una mayor estabilidad en los niveles de PM_{10} y una influencia más localizada de las fuentes de emisión.

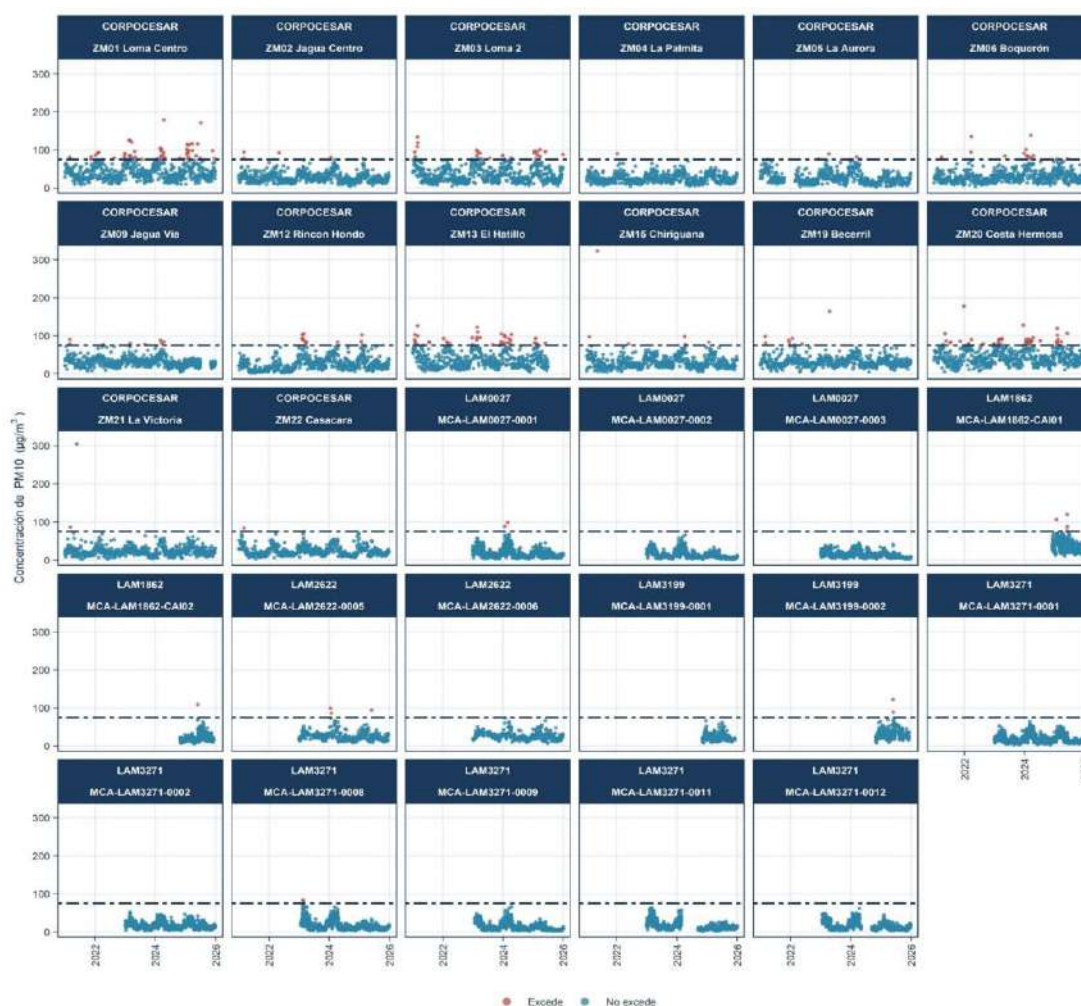
Adicionalmente, se identifican diferencias importantes entre estaciones específicas. Por ejemplo, ZM01, ZM20 y ZM13 presentan medianas más elevadas y mayor dispersión, lo que sugiere una mayor presión por fuentes emisoras en estas zonas. En contraste, estaciones como ZM02, ZM04 y varias estaciones de expedientes ANLA (MCA-LAM) presentan concentraciones con menor variabilidad, a diferencia del LAM3199 y LAM3271, los cuales

evidencian incrementos en la dispersión de datos en 2023 y 2024, asociados a cambios operacionales por manejo de mayor volumen explotado. Específicamente, para el LAM3199 en 2023 se autorizó por medio de cambio menor o de ajuste normal dentro del giro ordinario el recibo y manejo de carbón de terceros para cargue a los vagones del tren de la mina La Francia.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 7. Distribución de los promedios diarios de PM₁₀



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 8. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM₁₀

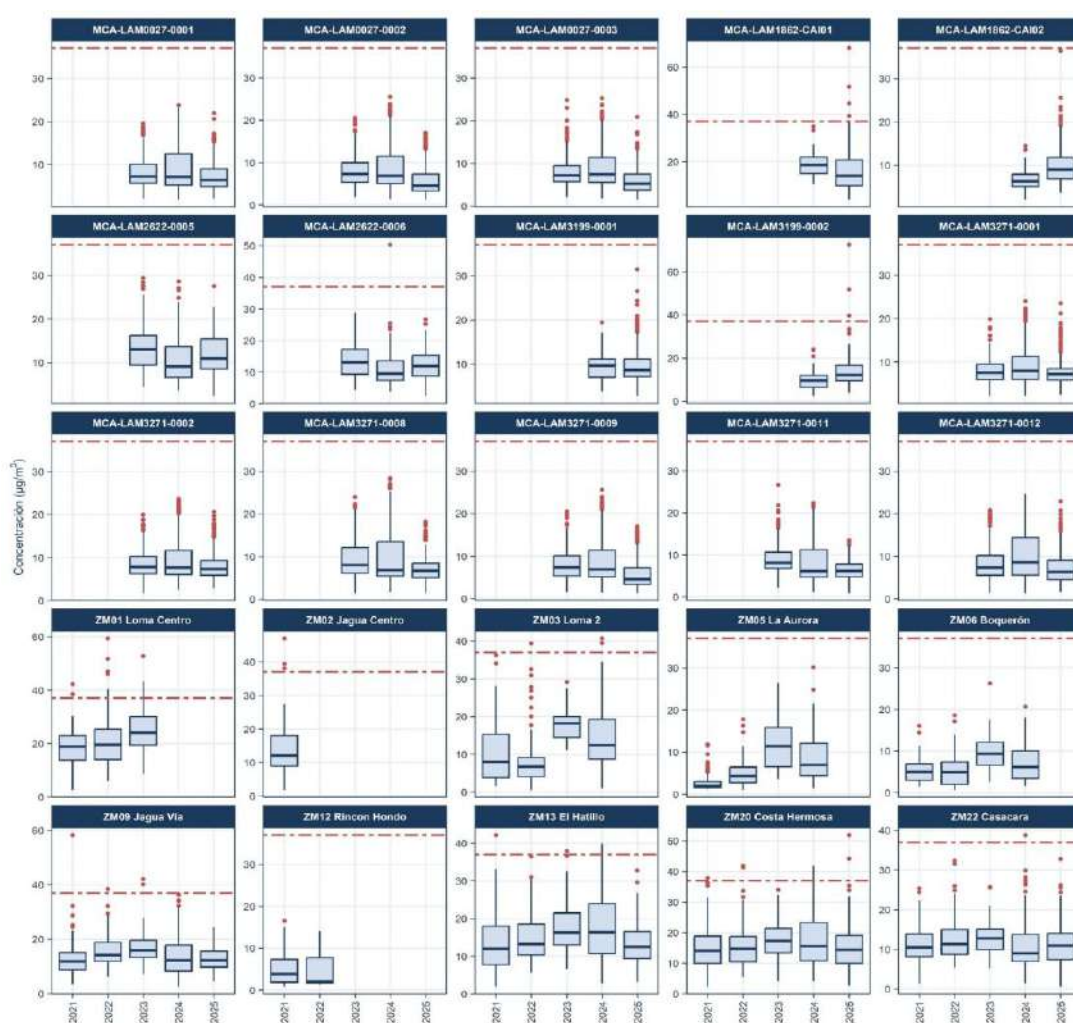
En relación con el material particulado PM_{2.5} (Figura 9 y Figura 10), la tendencia temporal diaria permitió determinar que las medianas y los rangos intercuartílicos se mantienen relativamente estables a lo largo del periodo, con ligeras variaciones entre años (2021-2024), particularmente para las estaciones de monitoreo del SVCAI de CORPOCESAR como ZM03 y ZM05. Este comportamiento es consistente con la dinámica previamente observada en los análisis mensuales, y sugiere una influencia combinada de factores meteorológicos y de la intensidad de las fuentes emisoras.

En relación con el cumplimiento normativo, la mayoría de las estaciones presentan medianas claramente por debajo del valor límite diario de 37µg/m³ (equivalente al estándar de 24 horas) establecido en la Resolución 2254 de 2017. No obstante, se identifican valores atípicos que superan este umbral en estaciones específicas, principalmente en MCA-LAM1862-0001 (CAI01), MCA-LAM3199-0002 y algunas estaciones de CORPOCESAR como



ZM13 y ZM20. En estos casos, se evidencian picos que alcanzan concentraciones cercanas o superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual indica la ocurrencia de episodios puntuales de alta concentración de material particulado fino.

El análisis de las series de tiempo diarias permite evidenciar que dichos picos corresponden a eventos aislados y de corta duración, más que a condiciones persistentes. En la mayoría de los registros, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ se mantienen en rangos bajos (entre 5 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con incrementos abruptos en días específicos. Este comportamiento sugiere la influencia de factores episódicos, tales como condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión (analizados en el numeral 4.2.2.), así como posibles eventos de combustión e incendios, los cuales según los informes de CORPOCESAR (2026), son recurrentes en la zona.



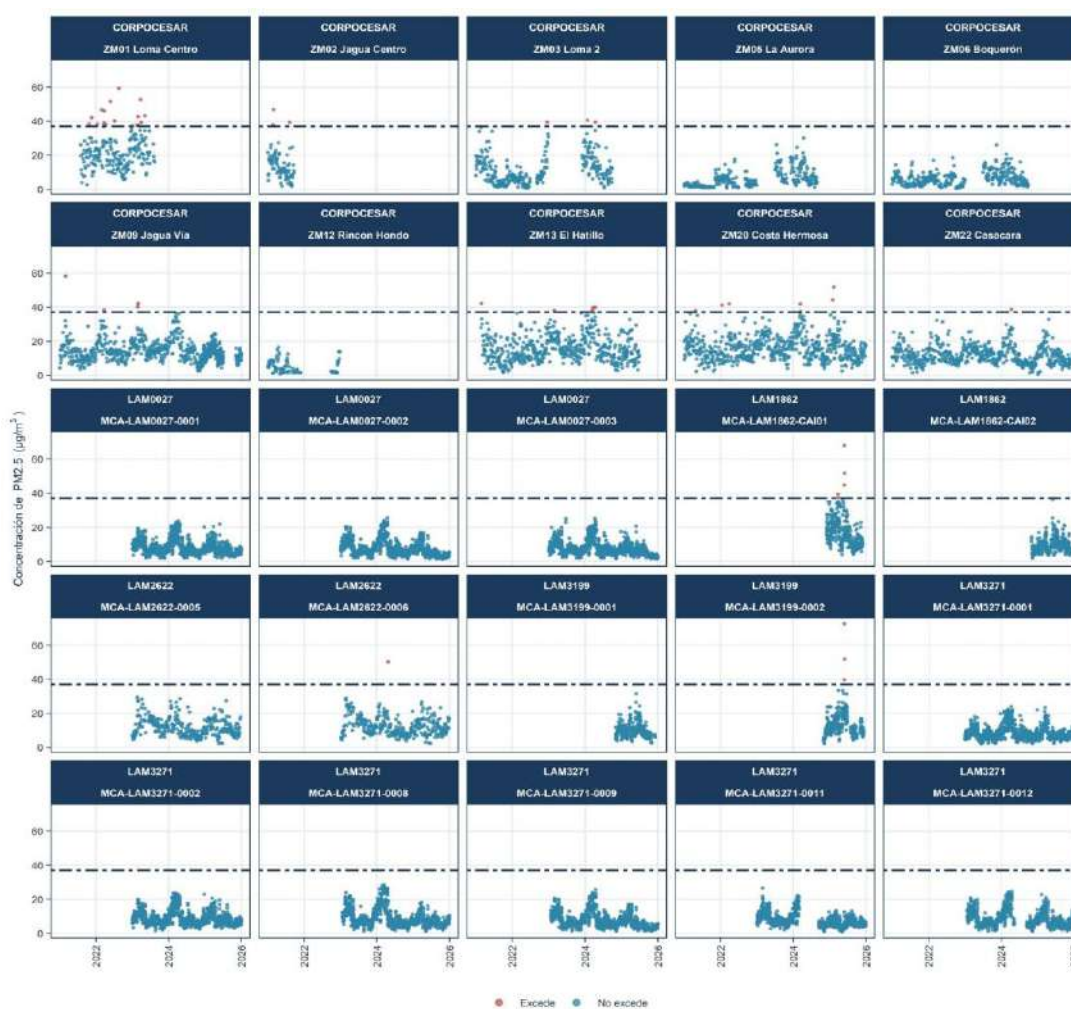
Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 9. Distribución de promedios diarios de $\text{PM}_{2.5}$



Al comparar los tipos de estaciones, se observa que las estaciones de monitoreo del SVCAI de CORPOCESAR (ZM) presentan una mayor dispersión en los datos y una mayor frecuencia de valores atípicos en comparación con las estaciones asociadas a los expedientes ANLA (MCA-LAM). Las estaciones MCA-LAM, en general, muestran distribuciones menores, lo que sugiere una influencia más localizada y posiblemente una mayor efectividad en la implementación de medidas de manejo en las fuentes directas. Por su parte, las estaciones CORPOCESAR reflejan el efecto acumulativo de múltiples fuentes.

En cuanto a diferencias entre estaciones, se destacan ZM01, ZM13 y ZM20 por presentar mayores niveles de dispersión y una mayor ocurrencia de eventos pico. Asimismo, estaciones como LAM1862-0001 (CAI01) y MCA-LAM3199-0002 evidencian incrementos en la variabilidad y presencia de valores altos en ciertos periodos (2025), lo que podría estar asociado a condiciones operativas específicas o a factores externos que afectan la calidad del aire.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026. A partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y la información descargada del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE - Medidos por CORPOCESAR.

Figura 10. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$



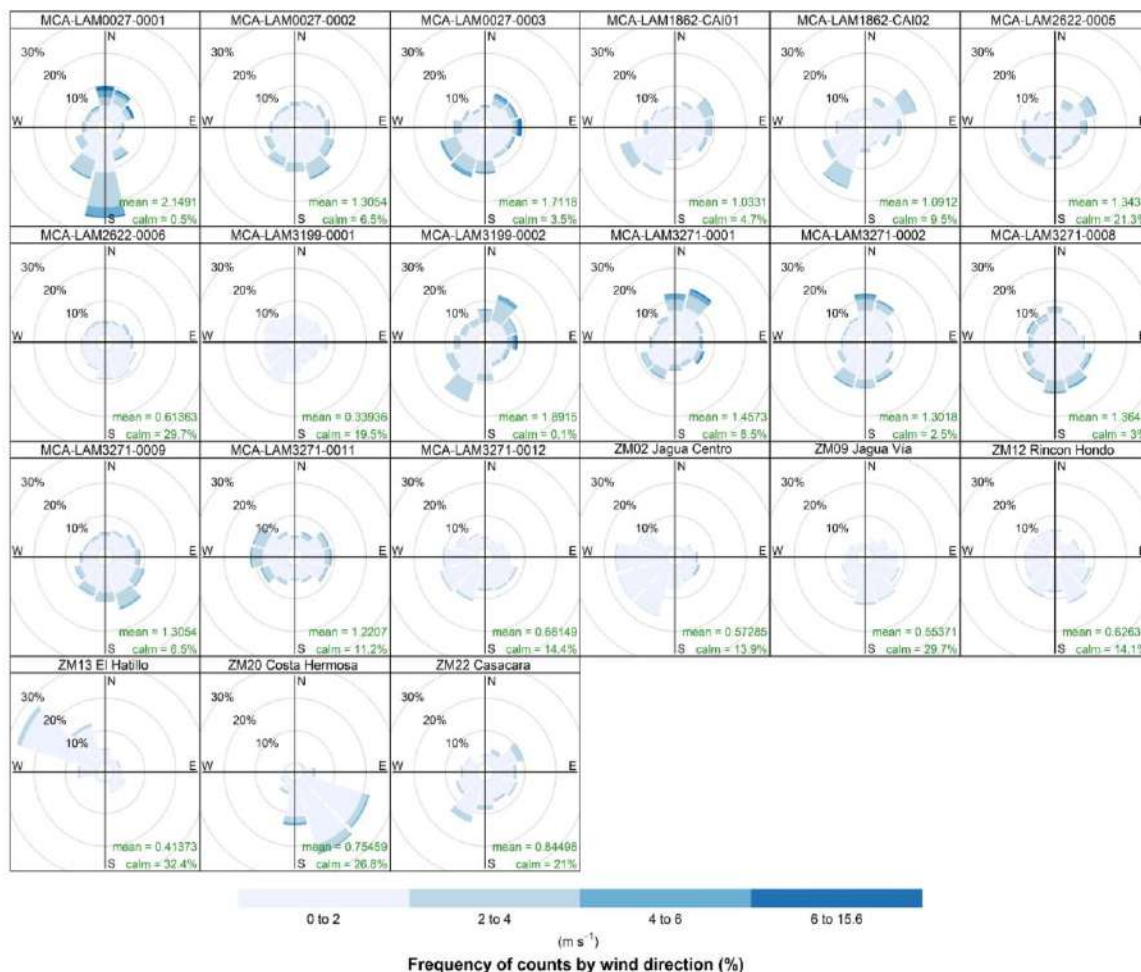
Los anteriores hallazgos destacan la necesidad de fortalecer el seguimiento y control de fuentes emisoras, así como implementar medidas de mitigación orientadas a prevenir estos episodios críticos, especialmente en las zonas donde la recurrencia y magnitud de las excedencias es mayor y/o recurrentemente durante cada año.

4.2.2. Comportamiento de la velocidad y de la dirección del viento

Respecto a las variables meteorológicas, a continuación, se analiza la velocidad y dirección del viento por medio de las rosas de viento obtenidas a partir de los datos para el año 2025 de los tres (3) proyectos que reportaron a la estrategia de monitoreo. Las rosas de viento generadas corresponden a cinco (5) para el LAM3271; tres (3) para el proyecto LAM0027 y dos (2) para el LAM2622.

De acuerdo con la **Figura 11**, se evidencia que no existe una tendencia de dirección del viento predominante en el área de la estrategia. En la zona norte, donde se ubican estaciones como MCA-LAM0027-0001, MCA-LAM0027-0002, MCA-LAM0027-0003 y MCA-LAM1862-CAI01, se presentan patrones variables con direcciones predominantes entre el este-sureste y el oeste-suroeste, mostrando comportamientos incluso opuestos entre estaciones cercanas. En la zona sur, donde se localizan estaciones como MCA-LAM2622-0006, ZM13 El Hatillo y ZM20 Costa Hermosa, se observa una tendencia más definida con vientos que se dirigen hacia el noreste, provenientes principalmente del suroeste y sur. Por su parte, en la zona central del área, donde se concentran estaciones como MCA-LAM3271-0001, MCA-LAM3271-0002, MCA-LAM3271-0008, MCA-LAM3271-0009 y MCA-LAM3271-0011, se presenta un predominio de dirección del viento hacia el noreste y este, aunque sin llegar a ser completamente homogéneo en todas las estaciones. En conjunto, la distribución direccional del viento continúa siendo heterogénea, lo que sugiere la influencia de factores locales como la topografía y las condiciones microclimáticas.

Las velocidades del viento altas pueden ayudar a dispersar los contaminantes, reduciendo su concentración en un área. Para el año 2025, los rangos de velocidad del viento en el área de la estrategia muestran que, aunque se presentan porcentajes en los rangos de 4 a 6 m/s y superiores a 6 m/s en algunas estaciones, el predominio general continúa concentrándose en el rango de 0 a 2 m/s, seguido del rango de 2 a 4 m/s. Este comportamiento indica que persisten condiciones de baja dispersión atmosférica en el área de estudio, similares a las observadas en el año anterior, con eventos de mayores velocidades poco frecuentes y de carácter puntual.



Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

Figura 11. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025

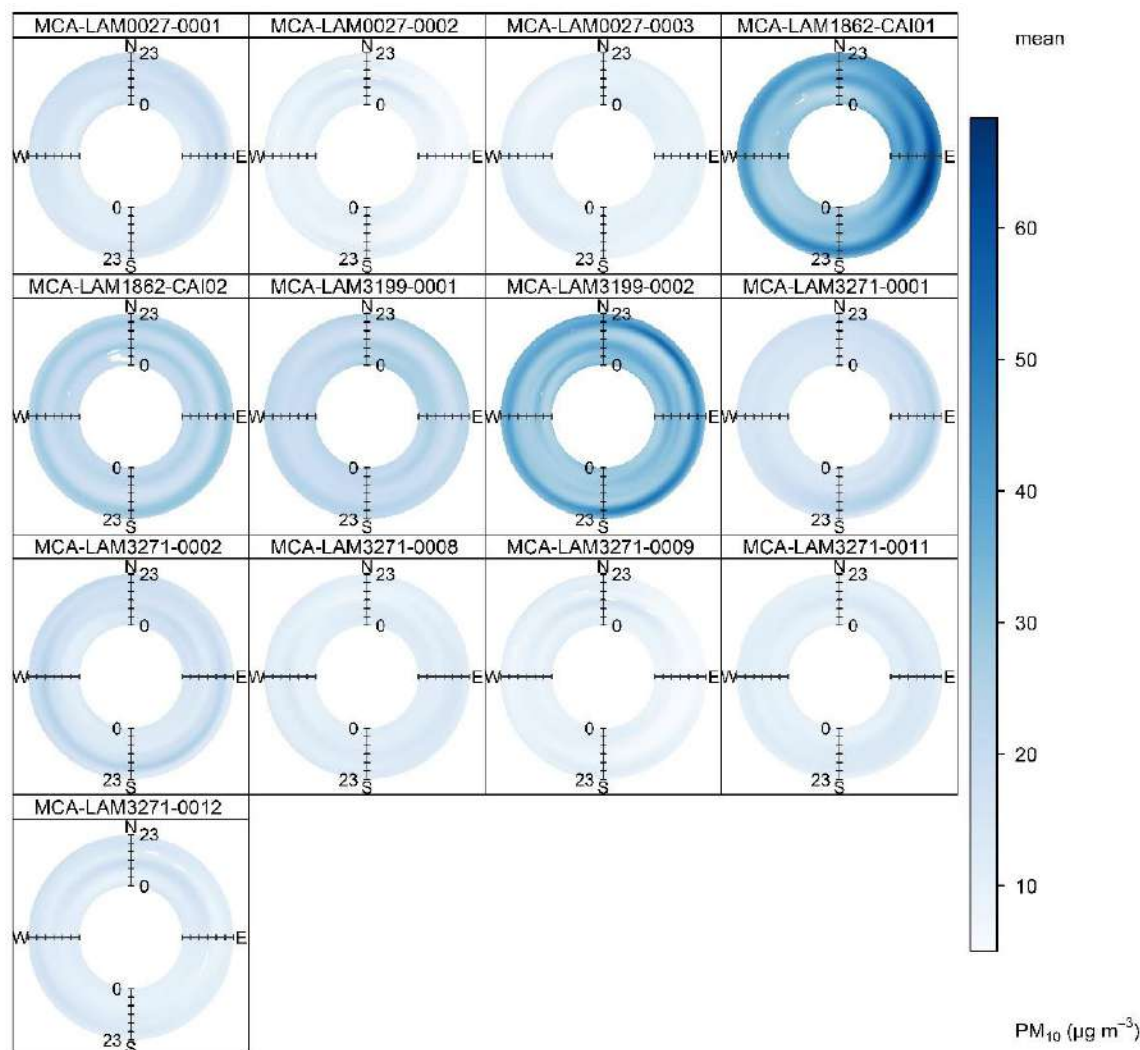
4.2.3. Análisis conjunto de concentraciones de material particulado con el comportamiento del viento

Con el fin de profundizar en el análisis de tendencias, y considerando que se dispone de datos de concentración con resolución horaria, estos fueron integrados con la información de dirección del viento y la hora del día, permitiendo la elaboración de los gráficos polares anulares para el año 2025.

En la Figura 12, se presentan concentraciones de PM_{10} , las cuales son bajas durante las horas de la madrugada y primeras horas de la mañana desde la mayoría de las direcciones. A partir de las 7:00 y hasta aproximadamente las 10:00. De igual forma, se observa este comportamiento progresivo de las concentraciones, especialmente en el periodo comprendido entre las 17:00 y 21:00 horas, donde varias estaciones registran valores cercanos o superiores a $30\text{--}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



En las estaciones MCA-LAM0027-0001 y MCA-LAM0027-0003, se identifican episodios puntuales con concentraciones más elevadas, asociadas principalmente a direcciones noreste y este, lo que sugiere la posible influencia de fuentes ubicadas en estas direcciones. En estaciones del proyecto LAM3271, se observan incrementos moderados en horas de la tarde, con aportes desde direcciones variables, lo que evidencia una dinámica más dispersa y posiblemente influenciada por múltiples fuentes locales.



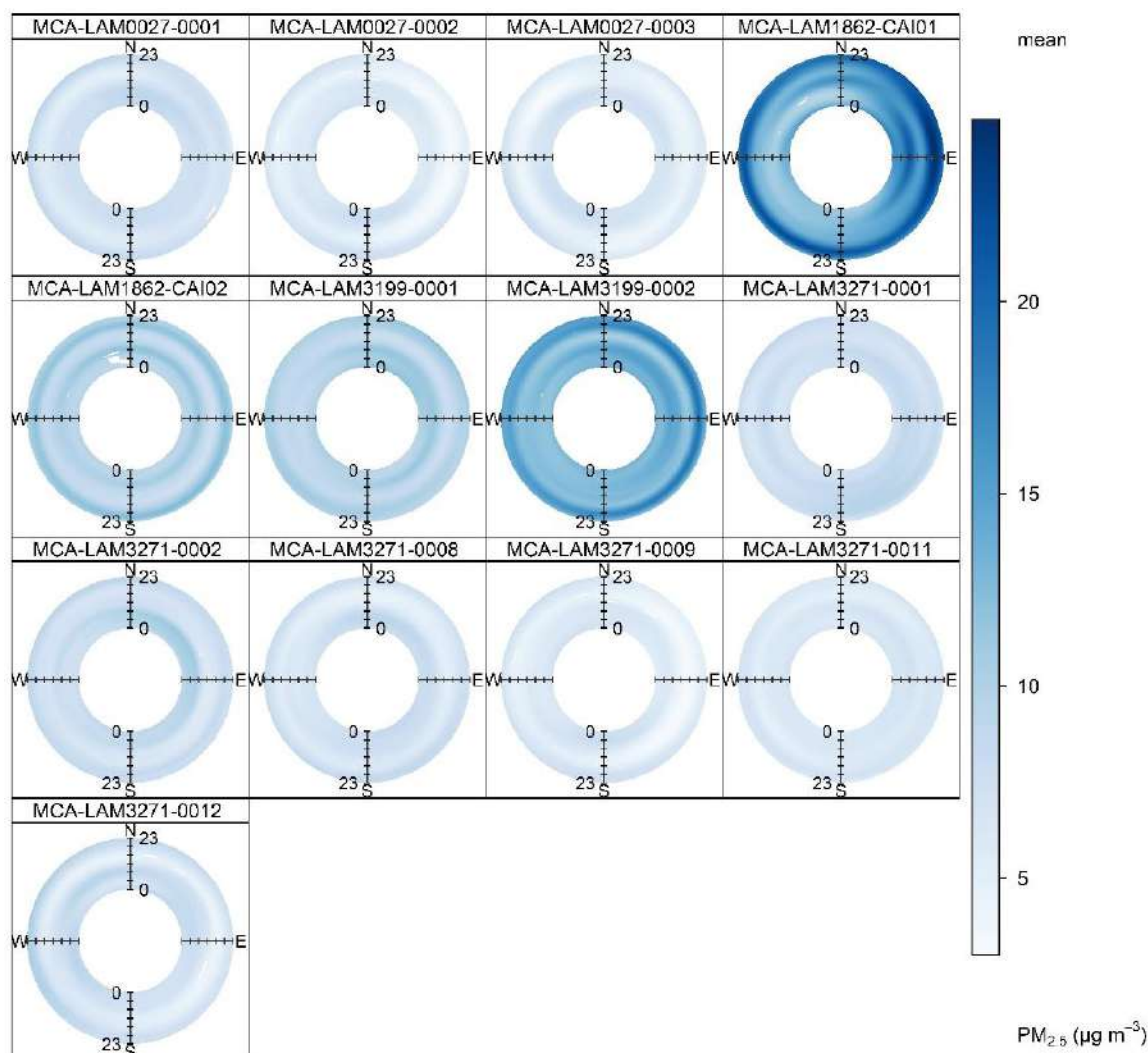
Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

Figura 12. Gráficos polares anulares para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025

Respecto al material particulado $PM_{2.5}$ como se muestra en la Figura 13, durante el transcurso del día se registran concentraciones que, en general, oscilan entre 5 y 15 $\mu g/m^3$. Las concentraciones más bajas se presentan hacia el mediodía y primeras horas de la tarde, mientras que los valores más altos tienden a registrarse en mañana (aproximadamente entre las 7:00 y 10:00) y otro en la tarde-noche (entre las 17:00 y 21:00). Este comportamiento sugiere condiciones atmosféricas más estables durante la noche, que favorecen la acumulación de contaminantes.



En estaciones como MCA-LAM3271-0008 y MCA-LAM3271-0010, se identifican concentraciones relativamente más altas asociadas a direcciones específicas (principalmente noreste y noroeste), lo cual podría estar relacionado con fuentes cercanas, como vías sin pavimentar o actividades locales dentro o en inmediaciones del área licenciada.



Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

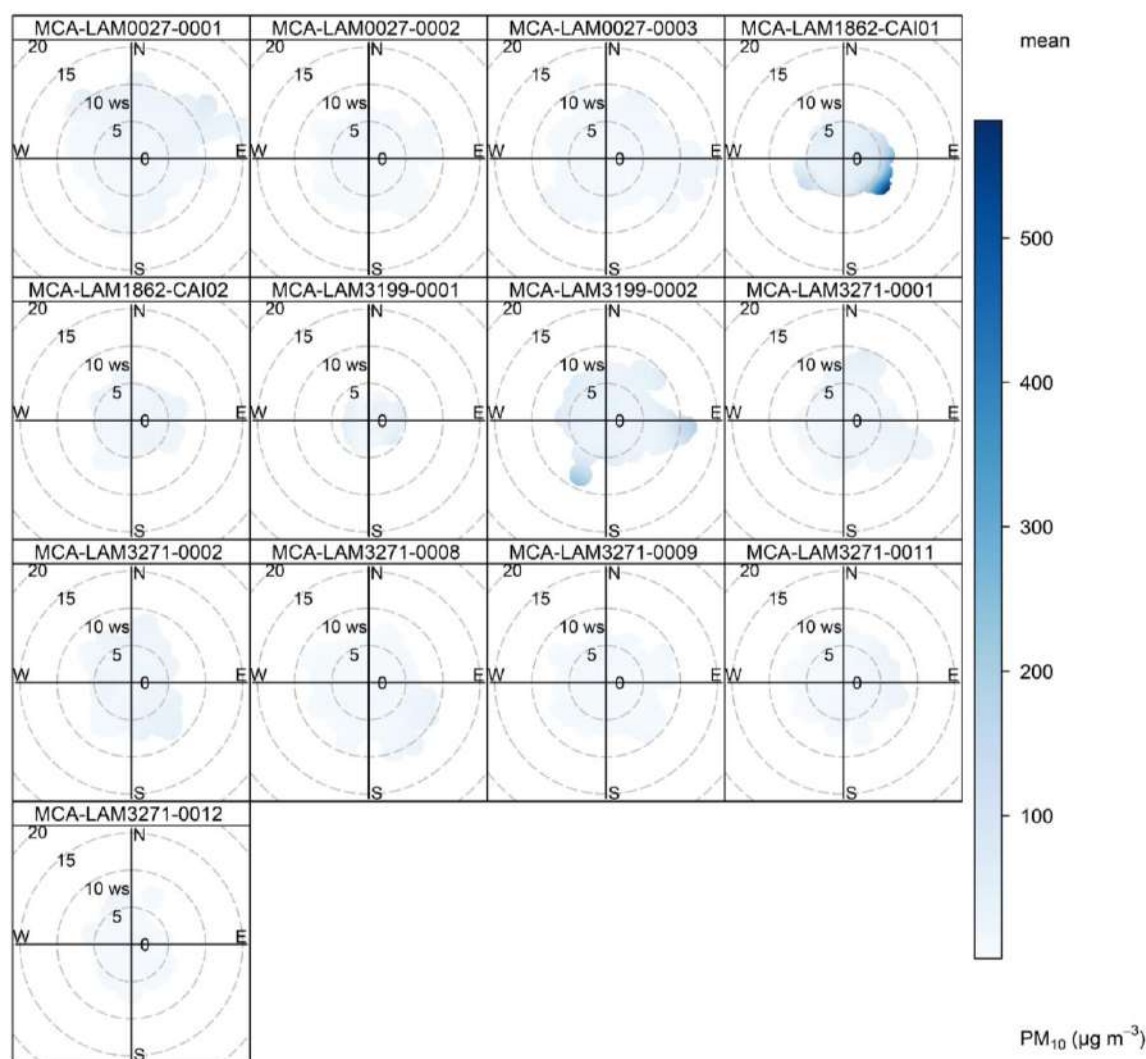
Figura 13. Gráficos polares anulares para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025

Al sustituir en los diagramas anulares la variable hora del día por la velocidad del viento, se obtienen los diagramas polares que permiten analizar la relación entre la dirección y la intensidad del viento con las concentraciones del contaminante. Para el caso de PM_{10} en 2025, se observa en la Figura 14 que las concentraciones más elevadas tienden a presentarse cuando la velocidad del viento supera los 4–6 m/s, particularmente desde direcciones este y noreste en estaciones como MCA-LAM0027-0001 y MCA-LAM0027-0003, lo que sugiere la



influencia de fuentes de emisión ubicadas a mayor distancia, posiblemente asociadas a actividades mineras u otras fuentes regionales.

En otras estaciones, especialmente del proyecto LAM3271, se evidencian concentraciones moderadas bajo condiciones de velocidades de viento bajas a intermedias (0–4 m/s) desde múltiples direcciones, lo que indica una mayor influencia de fuentes locales y procesos de recirculación.



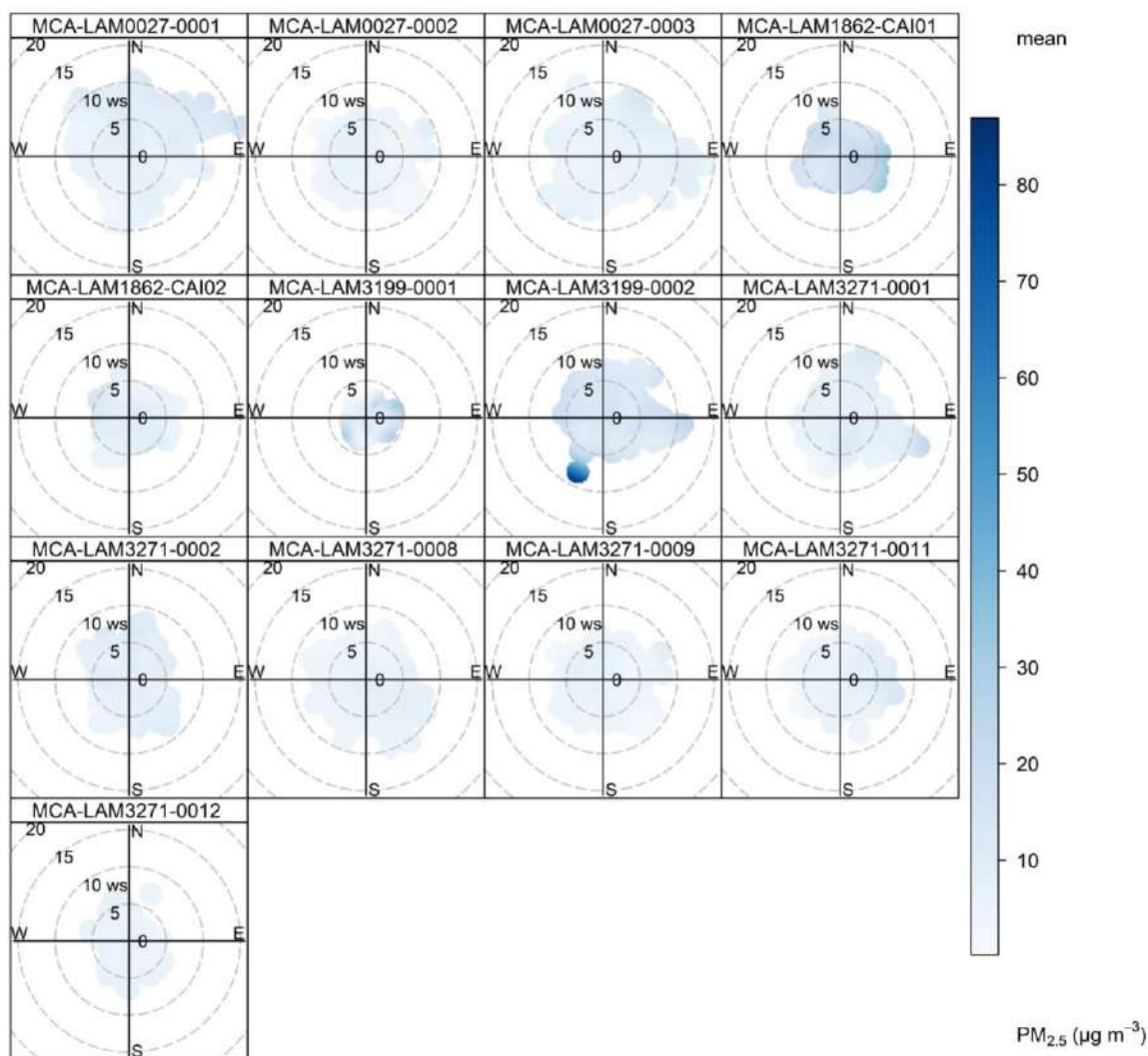
Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

Figura 14. Gráficos polares para las estaciones de calidad del aire (PM₁₀) en 2025

Para el PM_{2.5}, se observa en la Figura 15, un comportamiento similar al del PM₁₀, donde las mayores concentraciones se asocian a velocidades del viento superiores a 4–6 m/s provenientes del noreste y este, particularmente en estaciones del proyecto LAM0027, lo que refuerza la hipótesis de aportes de fuentes lejanas. No obstante, también se presentan



concentraciones moderadas bajo condiciones de bajas velocidades del viento, lo que evidencia la contribución de fuentes locales y condiciones de dispersión limitadas.



Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

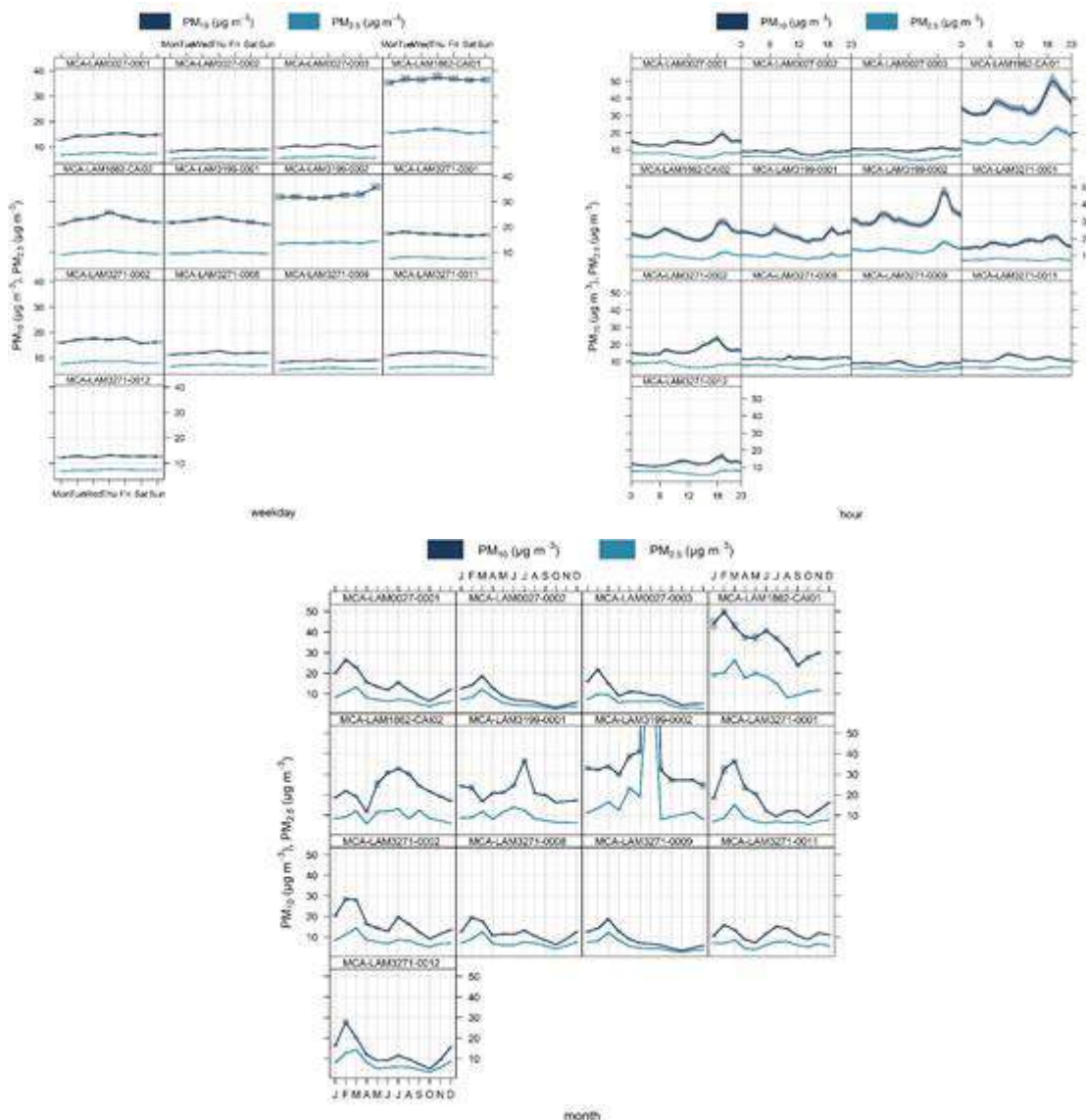
Figura 15. Gráficos polares para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025

4.2.4. Análisis de ciclos temporales

El presente análisis evalúa el comportamiento temporal del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la zona minera del Centro del Cesar durante el año 2025, a partir de la interpretación de la variación semanal, horaria y mensual registradas en las estaciones de monitoreo. Este enfoque permite identificar patrones asociados tanto a las dinámicas operativas de los proyectos mineros como a la influencia de las condiciones meteorológicas predominantes en la región. En la Figura 16, se muestran estas tendencias para el año 2025, donde las concentraciones de $PM_{2.5}$ se representan en color azul claro y las de PM_{10} en color azul oscuro.



- Variación semanal: se observa un comportamiento relativamente homogéneo a lo largo de los días, con ligeros incrementos en días hábiles, particularmente entre martes y jueves. De manera general, se evidencia una disminución de las concentraciones durante los fines de semana, lo cual sugiere una relación directa con la intensidad de las actividades operativas, especialmente aquellas asociadas al transporte y manejo de materiales. Este patrón es más evidente en PM_{10} , mientras que $PM_{2.5}$ presenta menor variabilidad.
- Variación horaria: se identifican dos picos diarios bien definidos: uno en horas de la mañana (aproximadamente entre las 7:00 y 10:00) y otro en la tarde-noche (entre las 17:00 y 21:00). Adicionalmente, las concentraciones más bajas se registran durante la madrugada. Cabe precisar que, los picos horarios reportados están asociados a las actividades de inicio y cierre de las jornadas operativas, así como a condiciones atmosféricas que limitan la dispersión de contaminantes, como la baja altura de mezcla en las primeras horas del día y la estabilidad atmosférica en la noche. Nuevamente, PM_{10} presenta mayor amplitud en estos picos, lo que evidencia la incidencia de fuentes mecánicas como la resuspensión de polvo; y para $PM_{2.5}$ existe el mismo comportamiento de menor variabilidad, referenciado en la variación semanal.
- Variación mensual: se identifica una estacionalidad marcada en las concentraciones de material particulado. Los valores más altos se registran durante los periodos secos, particularmente en los primeros meses del año y a mitad de este, mientras que los niveles más bajos coinciden con temporadas de mayor precipitación. Este comportamiento evidencia la influencia de los procesos de lavado atmosférico en épocas lluviosas y la mayor facilidad de resuspensión de partículas en condiciones secas. $PM_{2.5}$ sigue una tendencia similar, aunque con menor variabilidad en comparación con PM_{10} .



Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales, 2026

Figura 16. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire en 2025.

4.2.5. Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA

El análisis de los índices de Calidad de Aire (ICA) diarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$, establecidos en el Capítulo IV de la Resolución No. 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se presenta a continuación para cada expediente y punto de monitoreo analizado. Al respecto, es importante destacar que, de acuerdo con la mencionada resolución, el índice de calidad del aire se encuentra asociado con los siguientes efectos:



Tabla 6. Descripción general del Índice de Calidad del Aire

RANGO	COLOR	ESTADO O CATEGORÍA	EFFECTOS
0-50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.
51-100	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos poblaciones sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. 1) Ozono Troposférico: Las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las que constantemente realizan actividad física al aire libre, deben reducir su exposición a los contaminantes del aire. 2) Material Particulado: Las personas con enfermedad cardíaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo.
151-200	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud.
201-300	Púrpura	Muy Dañina para la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden experimentar efectos más graves para la salud.
301 – 500	Marrón	Peligroso	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud.

Fuente: Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Cabe precisar que, la totalidad de las figuras que exponen de manera diaria las categorías ICA registradas en las estaciones de monitoreo se presentan en el *Anexo: Índices de Calidad del Aire*, en el apartado final de este documento.

4.2.5.1. ICA - Material particulado PM_{10}

La Figura 17 presenta la distribución porcentual de las categorías ICA de PM_{10} en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la estrategia de monitoreo y del SEVCA-ZMC de CORPOCESAR para el año 2025.



Fuente: ANLA – SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y del SEVCA ZMC CORPOCESAR en SISAIRE, 2026

Figura 17. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM₁₀

De acuerdo con la Figura 17, se observa que la gran mayoría de las estaciones de monitoreo evaluadas presentan una alta proporción en la categoría “Buena”, destacándose que de las 29 estaciones evaluadas 22 registran más del 90% de sus datos en esta categoría, lo que evidencia condiciones de calidad del aire de PM₁₀ óptimas a lo largo de todo el período de evaluación. Por otro lado, se identifican estaciones con una fracción significativa de días en la categoría “Aceptable”, con porcentajes superiores al 20 %, siendo las más representativas ZM20 Costa Hermosa (28.9 %), ZM01 Loma Centro (28.7 %), ZM13 El Hatillo (25.4 %) y ZM03 Loma 2 (23.3 %), todas pertenecientes al SEVCA-ZMC de CORPOCESAR. En menor proporción, MCA-LAM1862-CAI01 (13.5%), ZM06 Boquerón (11.6 %) y ZM12 Rincón Hondo (10.3 %) también registran días en esta categoría.

Durante la evaluación del periodo 2025, solo la estación ZM01 Loma Centro registró días en la categoría "Dañina a la salud de grupos sensibles" para PM₁₀ con un porcentaje del 0.8%, que corresponde a 1 día del total del periodo evaluado.



Es relevante destacar que, aunque se presenta una mejora significativa en las condiciones de calidad del aire respecto al período anterior en muchas estaciones, algunas como ZM20 Costa Hermosa, ZM13 El Hatillo, ZM03 Loma 2 y ZM01 Loma Centro, presentan una leve disminución en la categoría “Buena”.

La predominancia de la categoría “Buena” en la gran mayoría de las estaciones, incluyendo aquellas con el 100 % de sus registros en este rango, refleja condiciones favorables de calidad del aire de PM_{10} para el año 2025 en la zona de monitoreo, lo que implica un riesgo mínimo para la salud de la población general. No obstante, la presencia de categorías “Aceptables” y un registro en categoría “Dañina a la salud de grupos sensibles” en estaciones del SEVCA-ZMC, particularmente en las comunidades de Loma Centro, Costa Hermosa, El Hatillo y Loma 2, requiere atención continua dado el potencial riesgo para grupos sensibles, como personas con enfermedades respiratorias, niños y adultos mayores residentes en estas zonas.

4.2.5.2. ICA - Material particulado $PM_{2.5}$

La Figura 18 presenta la distribución porcentual de las categorías ICA de $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la estrategia de monitoreo y del SEVCA-ZMC de CORPOCESAR para el año 2025.

Se observa que en la mayoría de las estaciones predomina la categoría “Buena”, destacándose las estaciones MCA-LAM0027-0001, MCA-LAM0027-0002, MCA-LAM0027-0003, MCA-LAM3271-0001, MCA-LAM3271-0008, MCA-LAM3271-0009 y MCA-LAM3271-0011, las cuales registran más del 90% de sus días en esta categoría. En un nivel igualmente favorable, las estaciones MCA-LAM1862-CAI02, MCA-LAM3199-0001, MCA-LAM3271-0002 y MCA-LAM3271-0012 presentan porcentajes muy elevados en esta categoría, reflejando condiciones atmosféricas saludables durante la totalidad del período evaluado

Así mismo, se identifican estaciones con una proporción significativa de días en la categoría “Aceptable”, lo que implica un riesgo moderado para grupos vulnerables o sensibles. Las estaciones con mayor presencia en esta categoría son ZM20 Costa Hermosa (55,6%), MCA-LAM1862-CAI01 (53,0%), ZM13 El Hatillo (46,3%), ZM09 Jagua Vía (44,3%), MCA-LAM3199-0002 (41,6%), MCA-LAM2622-0006 (40,2%) y con menores, aunque igualmente relevantes porcentajes en “Aceptable” se encuentran MCA-LAM2622-0005 (35,6%) y ZM22 Casacará (28,1%).



Fuente: ANLA – SIPTA, a partir de los datos del Sistema de Información de Licencias Ambientales y del SEVCA ZMC CORPOCESAR en SISAIRE, 2026

Figura 18. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM_{2.5}

A su vez, se registran niveles categorizados como “Dañina a la salud de grupos sensibles” en las estaciones ZM20 Costa Hermosa con un porcentaje de 1,6%, MCA-LAM3199-0002 y MCA-LAM1862-CAI01 con porcentajes de 0,7% y 0,9 respectivamente. Adicionalmente las estaciones, MCA-LAM3199-0002 y MCA-LAM1862-CAI01 presentan una pequeña fracción categorizada como “Dañina salud”, siendo las únicas estaciones en registrar este nivel de afectación durante el período evaluado, lo que amerita un seguimiento prioritario de sus condiciones locales.

En definitiva, las estaciones ZM13 El Hatillo, ZM20 Costa Hermosa, MCA-LAM3199-0002 y MCA-LAM1862-CAI01 presentan el menor desempeño en términos de condiciones de calidad del aire de PM_{2.5}, al registrar los menores porcentajes en la categoría “Buena” y, en algunos casos, la presencia de días en categorías que implican riesgos para la salud.



4.2.6. Actuaciones judiciales y procesos sancionatorios asociados al componente atmosférico en el área de la estrategia de monitoreo

En el marco del licenciamiento ambiental y de la estrategia de monitoreo para la Zona Minera del Centro del Cesar, se realizó la revisión de las actuaciones judiciales y de los procesos sancionatorios vigentes asociados a los expedientes objeto de análisis en el presente documento. Esta verificación se efectúa en el ámbito de las competencias de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, con énfasis en el componente atmosférico, particularmente en lo relacionado con la calidad del aire, como parte de las actividades de seguimiento y control ambiental.

Las órdenes judiciales corresponden a decisiones emitidas por autoridades competentes, orientadas a la protección de derechos fundamentales y colectivos, así como a la protección de los territorios y las comunidades del área de influencia. Por su parte, los procesos sancionatorios constituyen actuaciones administrativas adelantadas por la autoridad ambiental, dirigidas a investigar posibles incumplimientos de las obligaciones establecidas en los instrumentos de manejo y control ambiental, así como en la normatividad vigente o la generación de un daño ambiental y, de ser procedente, imponer las medidas preventivas y sanciones a que haya lugar.

Con base en la consulta realizada al Sistema de Información de Licencias Ambientales (SILA), no se evidencian procesos sancionatorios, ni órdenes/actuaciones judiciales vigentes para la Zona Minera del Centro del Cesar en relación con el componente atmosférico, específicamente en materia de calidad del aire. No obstante, en el marco de las funciones de seguimiento y control, se continuará con la verificación periódica de la información reportada, así como con el monitoreo del cumplimiento de las obligaciones ambientales asociadas a dicho componente, a fin de identificar de manera oportuna posibles desviaciones y adoptar las acciones a que haya lugar.



4.3. MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2.5}

Con el propósito de analizar desde una visión regional el estado de la calidad del aire en la Zona Minera del Cesar, considerando los proyectos licenciados activos, desde el Centro de Monitoreo de los Recursos Naturales de la ANLA se desarrolló un modelo regional de dispersión de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, con registros de variables meteorológicas y de emisiones atmosféricas asociados al Informe de Cumplimiento Ambiental del año 2024, según la información disponible de proyectos que desarrollan actividades mineras contemplados a continuación.

Tabla 7. Proyectos incluidos en modelación de La Zona Minera del Cesar

ACTIVIDAD	PROYECTO/FUENTE	EXPEDIENTE	ESCENARIO	INVENTARIO EMISIONES
PROYECTOS MINEROS	La Loma – Pribbenow	LAM0027	Estado Actual	ICA – 2024
	La Jagua	LAM1203	Estado Actual	ICA – 2024
	El Hatillo	LAM1862	Estado Actual	ICA – 2024
	Calenturitas	LAM2622	Estado Actual	ICA – 2024
	La Francia	LAM3199	Estado Actual	ICA – 2024
	El Descanso, Similoa y Rincon Hondo	LAM3271	Estado Actual	ICA – 2024

Fuente: ANLA - SIPTA, Documento técnico modelo de dispersión de emisiones contaminantes de PM₁₀-PM_{2.5} para la Zona Minera del Cesar. ANLA, 2026.

4.3.1. Parametrización

Durante el desarrollo de la modelación atmosférica, se identificaron varias restricciones y/o limitaciones, principalmente relacionadas con la exclusión de fuentes de emisión de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) que no son competencia del control y seguimiento de la ANLA. Estas fuentes incluyen:

- Las vías públicas pavimentadas y o en afirmado.
- Quema de basura y biomasa en la región.
- Ingreso de otras fuentes externas de contaminación de material particulado.

Para la implementación del modelo de dispersión de contaminantes en la región de la Zona Minera del Cesar se empleó el modelo AERMOD, recomendado por la EPA, integrando la



información meteorológica reportada en los expedientes Meteorología WRF del expediente LAM0027, LAM1862, LAM3199 y LAM3271 siendo la más representativa en el área de estudio.

Referente a las tasas de emisión se realizó la asignación de la siguiente forma:

- Información primaria:
 - i. Soportes de modelación de cada expediente.
- Escenarios de modelación:
 - i. Escenario Actual: Basado en las actividades desarrolladas en 2023 por los proyectos incluidos en la estrategia de monitoreo.
- Receptores sensibles:
 - i. Se contemplaron la ubicación del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire del CORPOCESAR que se localizan dentro de los principales receptores cercanos a los proyectos mineros, permitiendo conocer el estado y condición de los niveles de contaminación del aire para evaluar los aportes específicos de los proyectos mineros.
- Concentración de Fondo: La concentración de fondo empleado en la modelación fue definido en estricta conformidad con lo reportado en los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA) del año 2024 para los proyectos objeto de este estudio que indicaron que:

“(...) De acuerdo con el comportamiento de los vientos en la ZMC, se pueden considerar las estaciones ZM15 Chirigüaná y ZM22 Casacará que determinen la calidad de aire entrante al dominio de análisis (vientos dominantes procedentes desde el suroeste y noreste, según la estación IDEAM La Francia). Estas estaciones, por sus ubicaciones en los extremos suroeste y noreste, respectivamente, de la ZMC, podría seleccionarse como estaciones de fondo en la región. (...)”
- Presentando las siguientes concentraciones:
 - i. Concentración de fondo PM_{10} : $11 \mu g/m^3$
 - ii. Concentración de fondo $PM_{2.5}$: $3,9 \mu g/m^3$

Es importante precisar que esta metodología de modelación se implementa con la finalidad de evaluar, bajo un alcance regional, el impacto acumulativo del componente atmosférico empleando información de los proyectos licenciados por la ANLA que cuentan con estrategia de monitoreo regional en términos de calidad de aire. Sin embargo, no reemplaza los lineamientos establecidos para la estimación de emisiones indicado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ni la Metodología General vigente para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales vigentes.



4.3.2. Resultados

Frente a los resultados de PM_{10} y $PM_{2.5}$, en la Tabla 8 se presentan las estadísticas descriptivas correspondientes a los puntos denominados como receptores sensibles, seleccionados conforme a la metodología definida en el numeral 4.3.1.

Tabla 8. Estadísticos Concentraciones anuales sobre receptores discretos – Escenario Actual

CONTAMINANTE	ESCENARIO	MEDIA	MEDIANA	MÁXIMO	MÍNIMO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
PM_{10}	Actual	6,29	6,06	18,73	0,74	4,17
$PM_{2.5}$	Actual	3,64	4,07	7,37	0,46	1,72

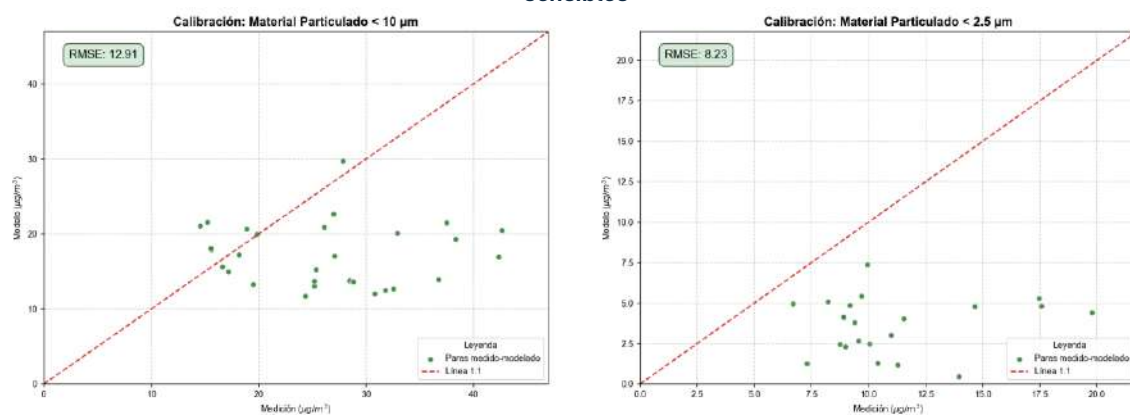
Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

Producto de la modelación para el escenario actual (año 2024), los resultados muestran que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los receptores sensibles presentan una distribución estable y de baja dispersión espacial, con promedios de $6,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Esta baja variabilidad se evidencia en las reducidas desviaciones estándar ($4,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $1,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) y en que las medianas ($6,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se mantienen cercanas a las medias, lo que indica una carga base relativamente uniforme en el territorio.

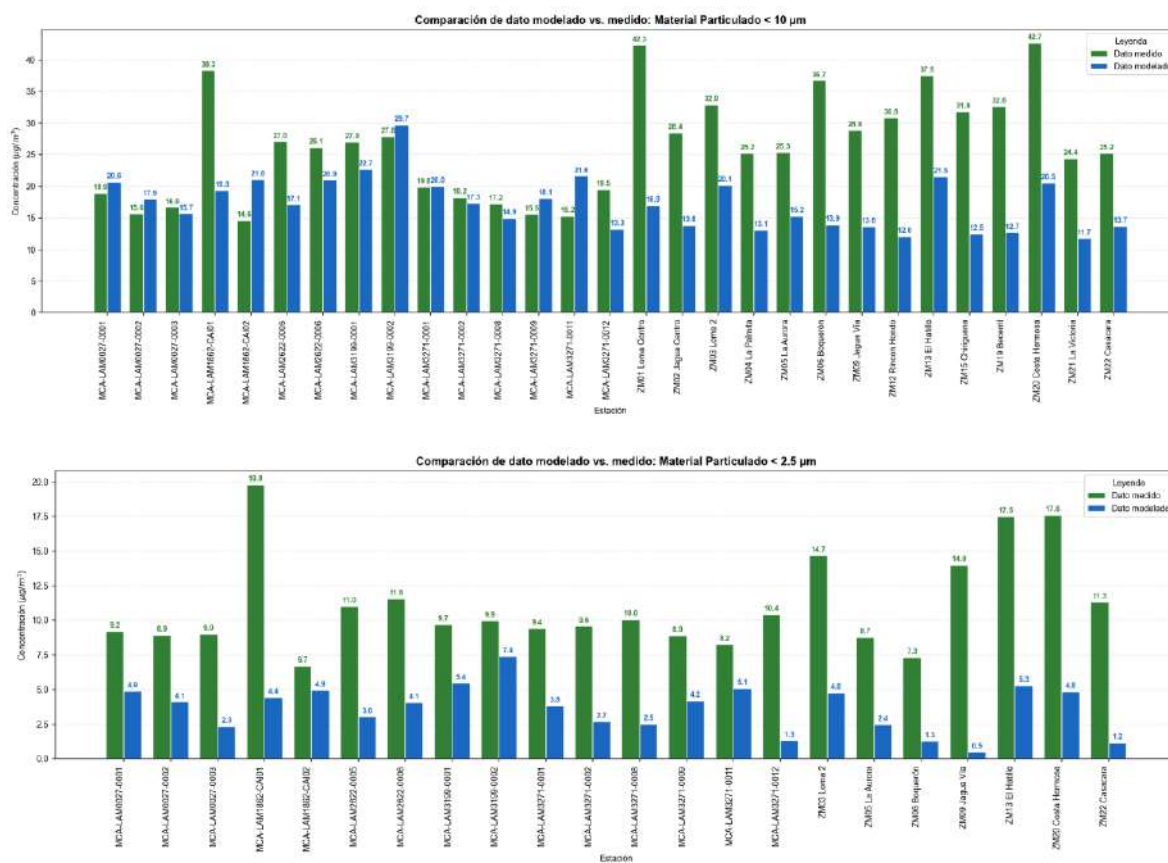
Sin embargo, el contraste entre los valores mínimos ($0,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $0,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) y los valores máximos registrados ($18,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $7,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) permite identificar zonas puntuales de mayor sensibilidad ambiental. En estas áreas, la interacción entre las emisiones locales y las condiciones de fondo puede generar incrementos en los niveles de inmisión atribuibles a las fuentes o proyectos evaluados.

Comparación con los datos medidos: Para validar los resultados de la modelación, se realizó una comparación de los resultados de modelación de PM_{10} y $PM_{2.5}$ y los datos medidos a través del SVCA. La Figura 19 presenta dicha comparación.

Figura 19. Comparación entre concentraciones modeladas y medidas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en receptores sensibles



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

De acuerdo con la figura anterior, el análisis entre la información medida y los resultados modelados para PM_{10} evidencia que el modelo presenta una dispersión significativa respecto a la línea 1:1. En particular, se observa una tendencia generalizada a subestimar las concentraciones. Esta subestimación es aún más marcada en los valores altos (por encima de los 30 $\mu g/m^3$ medidos), donde el modelo arroja resultados considerablemente menores



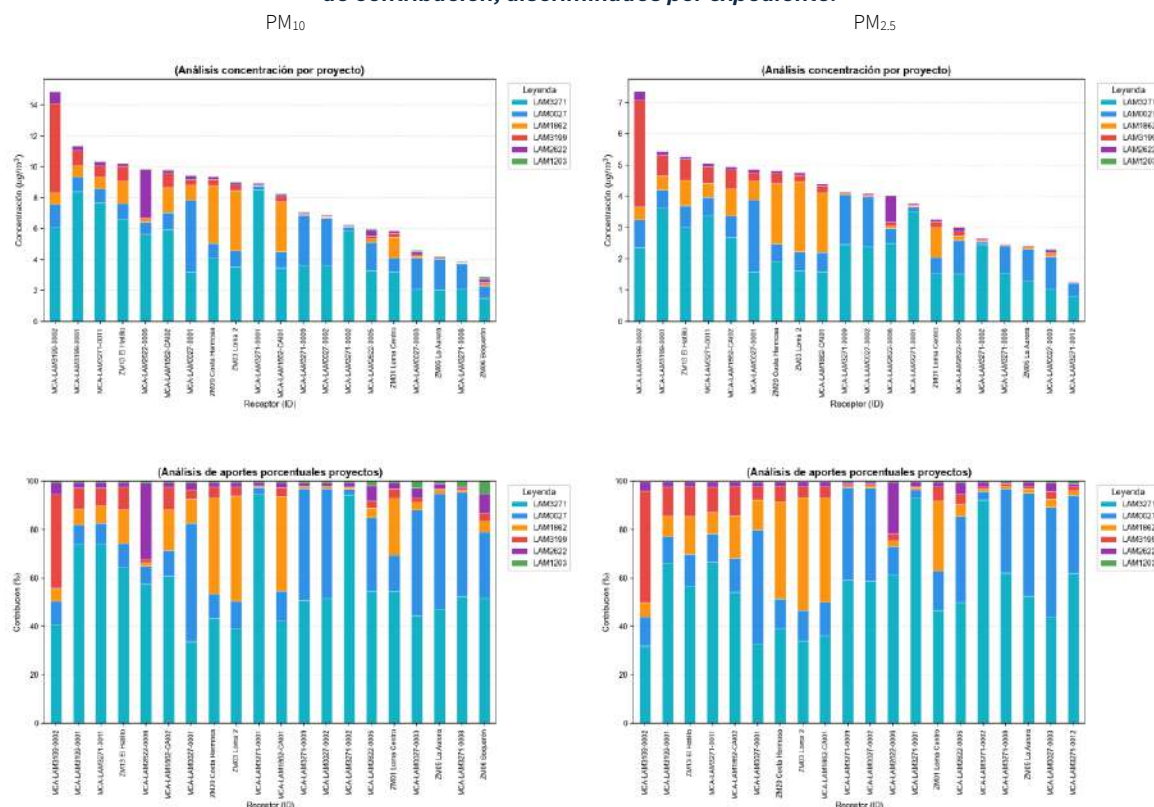
(en el rango de los 15 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), alejándose de la correspondencia ideal. El Error Cuadrático Medio (RMSE) de 12,91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ refleja una variación moderada a alta frente a los datos observados, lo cual resulta esperable considerando que se trata de un modelo regional, aunque evidencia limitaciones para capturar los picos de concentración.

En el caso de $\text{PM}_{2.5}$, el modelo muestra un comportamiento mucho más marcado de subestimación sistemática en la práctica totalidad de los puntos evaluados, ya que las concentraciones medidas se encuentran consistentemente por encima de las modeladas. Además, el modelo reproduce un rango marcadamente más estrecho de concentraciones (en su mayoría por debajo de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que limita su capacidad para capturar la variabilidad y los picos observados a través de las mediciones, que llegan a rozar los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque el RMSE (8,23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) es nominalmente más bajo que en PM_{10} , en términos relativos resulta mucho más significativo debido a que las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ son más bajas y se concentran en un rango reducido. Es importante precisar que el modelo únicamente contempla las fuentes licenciadas por la ANLA, por lo que otras fuentes adicionales no son consideradas en el inventario de emisiones. Esto genera que dichas fuentes no queden correctamente descritas dentro de la modelación y explica, en parte, la subestimación sistemática observada. No obstante, para los resultados de PM_{10} muestran una mejor correspondencia entre lo modelado y lo medido, lo que refuerza la validez del ejercicio en contextos donde las principales fuentes están incluidas.

En conjunto, los resultados sugieren que, si bien el modelo presenta limitaciones para representar la variabilidad local por la ausencia de algunas fuentes, constituye una herramienta válida y útil en el contexto regional para identificar patrones generales, áreas sensibles y estimar la acumulación de impactos en la calidad del aire.

Los datos del análisis de receptores, correspondientes al Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, se presentan clasificados según su concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y su porcentaje de contribución en cada estación de la red de monitoreo regional. Asimismo, la información se estructura por expediente, lo que facilita la identificación de los impactos acumulativos de cada proyecto en la zona.

Figura 20. Relación de aporte estaciones de monitoreo regional de PM_{10} : Concentración ($\mu g/m^3$) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

La Figura 20, permite evidenciar que la contribución conjunta de los proyectos en los niveles de PM_{10} en los receptores sensibles (sin considerar la concentración de fondo) confirman la presencia de impactos acumulativos, particularmente en las zonas más próximas al desarrollo de actividades de explotación minera de los expedientes LAM3199 y LAM3271, donde se identificó que las concentraciones aportadas por los distintos proyectos evidencia que el receptor MCA-LAM3199-0002 registra los niveles acumulativos más altos de toda la red, alcanzando magnitudes aproximadas de $14,5 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $7,3 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$. En este punto específico, el proyecto LAM3199 genera un impacto directo y dominante sobre la calidad del aire. Este proyecto aporta cerca de $5,8 \mu g/m^3$ en el escenario de PM_{10} y $3,4 \mu g/m^3$ en el de $PM_{2.5}$, lo que representa entre el 40% y el 45% de la concentración total de los proyectos modelados en dicho receptor, demostrando una fuerte y marcada influencia local de esta fuente.

A nivel regional, el proyecto LAM3271 actúa funcionalmente como la carga base para esta agrupación de receptores, al presentar el aporte sostenido más alto en la inmensa mayoría de los puntos de la red. Sus contribuciones fluctúan desde los $1,5 \mu g/m^3$ hasta un máximo de $8,5 \mu g/m^3$ (registrado en el receptor MCA-LAM3199-0001) para PM_{10} , y se mantienen constantes entre $0,8 \mu g/m^3$ y $3,6 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$. Este comportamiento indica que las emisiones de LAM3271 poseen un radio de dispersión espacial muy amplio en el territorio



evaluado, elevando de manera generalizada el umbral mínimo de las concentraciones en la zona.

Por otro lado, se identifican aportes intermedios con amplia distribución espacial provenientes de los proyectos LAM0027 y LAM1862. En receptores como MCA-LAM0027-0001, ZM20 Costa Hermosa o ZM03 Loma 2, la superposición continua de las plumas de estos dos proyectos suma de forma combinada entre 3,0 y 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , y entre 1,5 y 2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$. En contraste, el proyecto LAM2622 exhibe una dinámica de impacto altamente localizado; aunque su contribución general es muy baja (inferior a 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en casi toda la red, genera un pico específico de afectación en su receptor asociado (MCA-LAM2622-0006). En este punto, aporta aproximadamente 3,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , constituyendo cerca del 30% del impacto total de los proyectos en ese sitio.

En síntesis, la dinámica de la cuenca atmosférica modelada muestra que el proyecto LAM3271 es el principal responsable de establecer e incrementar la carga base de las concentraciones a nivel regional. Sin embargo, los valores máximos absolutos registrados en la red no dependen exclusivamente de esta dispersión amplia, sino que son el resultado directo de la suma de esta carga base con emisiones intensas y altamente localizadas provenientes de proyectos contiguos a receptores específicos, tal como se evidencia claramente con el comportamiento de LAM3199.

A continuación, se presenta el análisis detallado de las concentraciones de material particulado en los receptores sensibles que conforman la red de monitoreo regional. El objetivo de esta evaluación es cuantificar el aporte individual de las distintas fuentes de emisión (correspondientes a los proyectos evaluados) frente a la carga de fondo establecida para el área de estudio. Este desglose porcentual y másico permite identificar los impactos acumulativos sobre la calidad del aire, facilitando la comprensión de la dinámica espacial de los contaminantes y la determinación de los proyectos con mayor grado de influencia directa sobre cada estación de monitoreo.

Para la correcta interpretación de las Tablas 9 y 10 conviene distinguir dos magnitudes: el aporte neto de cada proyecto (la contribución individual de sus fuentes, sin fondo) y la concentración total modelada en el receptor (suma de todos los aportes más la concentración de fondo regional). El análisis de cumplimiento normativo se realiza sobre la concentración total, mientras que la evaluación de impactos acumulativos por proyecto se basa en los aportes netos.

Tabla 9. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM_{10}

ID	Fondo		LAM0027		LAM1203		LAM1862		LAM2622		LAM3199		LAM3271		Concentración
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	
MCA-LAM3199-0002	11,00	42,4%	1,45	5,6%	0,06	0,2%	0,77	3,0%	0,75	2,9%	5,78	22,3%	6,10	23,5%	25,91
MCA-LAM3199-0001	11,00	49,1%	0,92	4,1%	0,05	0,2%	0,75	3,4%	0,28	1,3%	0,97	4,3%	8,42	37,6%	22,39
MCA-LAM3271-0011	11,00	51,5%	0,91	4,3%	0,04	0,2%	0,76	3,6%	0,25	1,2%	0,73	3,4%	7,67	35,9%	21,37
ZM13 El Hatillo	11,00	51,7%	1,04	4,9%	0,04	0,2%	1,46	6,9%	0,21	1,0%	0,92	4,3%	6,59	31,0%	21,27
MCA-LAM2622-0006	11,00	52,7%	0,76	3,6%	0,08	0,4%	0,13	0,6%	3,10	14,9%	0,14	0,7%	5,67	27,1%	20,88
MCA-LAM1862-CAI02	11,00	52,8%	1,07	5,1%	0,04	0,2%	1,66	8,0%	0,20	1,0%	0,90	4,3%	5,96	28,6%	20,83
MCA-LAM0027-0001	11,00	53,7%	4,67	22,8%	0,06	0,3%	0,95	4,6%	0,25	1,2%	0,39	1,9%	3,18	15,5%	20,50
ZM20 Costa Hermosa	11,00	53,9%	0,97	4,7%	0,04	0,2%	3,75	18,4%	0,18	0,9%	0,41	2,0%	4,06	19,9%	20,42
ZM03 Loma 2	11,00	54,9%	1,03	5,2%	0,04	0,2%	3,91	19,5%	0,18	0,9%	0,32	1,6%	3,53	17,6%	20,03
MCA-LAM3271-0001	11,00	55,1%	0,21	1,1%	0,03	0,2%	0,04	0,2%	0,13	0,6%	0,03	0,2%	8,53	42,7%	19,98
MCA-LAM1862-CAI01	11,00	57,1%	1,03	5,3%	0,04	0,2%	3,24	16,8%	0,18	0,9%	0,30	1,6%	3,47	18,0%	19,26



ID	Fondo		LAM0027		LAM1203		LAM1862		LAM2622		LAM3199		LAM3271		Concentración
	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	
MCA-LAM3271-0009	11,00	60,9%	3,26	18,0%	0,05	0,3%	0,06	0,3%	0,08	0,4%	0,02	0,1%	3,60	19,9%	18,07
MCA-LAM0027-0002	11,00	61,5%	3,14	17,5%	0,06	0,3%	0,06	0,3%	0,07	0,4%	0,02	0,1%	3,55	19,8%	17,90
MCA-LAM3271-0002	11,00	63,7%	0,15	0,9%	0,05	0,3%	0,04	0,2%	0,09	0,5%	0,03	0,2%	5,90	34,2%	17,26
MCA-LAM2622-0005	11,00	64,7%	1,82	10,7%	0,10	0,6%	0,25	1,5%	0,38	2,2%	0,18	1,0%	3,28	19,3%	17,01
ZM01 Loma Centro	11,00	65,1%	0,89	5,2%	0,04	0,2%	1,38	8,1%	0,14	0,8%	0,24	1,4%	3,21	19,0%	16,89
MCA-LAM0027-0003	11,00	70,4%	2,03	13,0%	0,13	0,8%	0,14	0,9%	0,19	1,2%	0,08	0,5%	2,05	13,1%	15,63
ZM05 La Aurora	11,00	72,2%	2,03	13,3%	0,04	0,3%	0,06	0,4%	0,08	0,5%	0,02	0,1%	2,00	13,1%	15,24
MCA-LAM3271-0008	11,00	73,8%	1,69	11,3%	0,08	0,6%	0,04	0,2%	0,03	0,2%	0,03	0,2%	2,05	13,7%	14,91
ZM06 Boquerón	11,00	79,1%	0,80	5,8%	0,15	1,1%	0,13	0,9%	0,23	1,6%	0,10	0,7%	1,49	10,7%	13,90
ZM02 Jagua Centro	11,00	79,6%	0,26	1,9%	2,01	14,5%	0,03	0,2%	0,02	0,1%	0,02	0,1%	0,49	3,5%	13,81
ZM22 Casacara	11,00	80,4%	0,12	0,9%	0,04	0,3%	0,03	0,2%	0,08	0,6%	0,03	0,2%	2,39	17,4%	13,68
ZM09 Jagua Via	11,00	80,7%	0,28	2,0%	1,75	12,9%	0,02	0,1%	0,02	0,2%	0,02	0,1%	0,54	3,9%	13,62
MCA-LAM3271-0012	11,00	83,0%	0,89	6,7%	0,08	0,6%	0,04	0,3%	0,03	0,3%	0,02	0,2%	1,19	9,0%	13,25
ZM04 La Palmita	11,00	84,1%	0,80	6,1%	0,24	1,8%	0,03	0,2%	0,04	0,3%	0,02	0,2%	0,96	7,3%	13,09
ZM19 Becerril	11,00	86,8%	0,26	2,1%	0,15	1,2%	0,02	0,2%	0,08	0,6%	0,03	0,2%	1,13	8,9%	12,67
ZM15 Chiriguana	11,00	88,2%	0,56	4,5%	0,04	0,3%	0,03	0,3%	0,04	0,3%	0,02	0,2%	0,78	6,3%	12,47
ZM12 Rincon Hondo	11,00	91,4%	0,32	2,7%	0,08	0,7%	0,03	0,2%	0,02	0,1%	0,02	0,1%	0,56	4,7%	12,03
ZM21 La Victoria	11,00	93,7%	0,05	0,4%	0,53	4,5%	0,01	0,1%	0,01	0,1%	0,01	0,1%	0,14	1,2%	11,74

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

El análisis detallado de la tabla de aportes a la concentración total para PM₁₀ por receptor revela que la contribución de los diferentes proyectos (LAM0027, LAM1203, LAM1862, LAM2622, LAM3199 y LAM3271) es marginal en comparación con la concentración de fondo, la cual domina de manera absoluta el escenario de calidad del aire. En todos los receptores evaluados, el fondo aporta un valor constante de 11,00 µg/m³, lo que representa entre el 42,4% (en MCA-LAM3199-0002) y el 93,7% (en ZM21 La Victoria) de la concentración total modelada. Entre las fuentes específicas, el proyecto LAM3271 destaca como el mayor contribuyente individual, generando aportes significativos en receptores críticos como MCA-LAM3199-0001 (8,42 µg/m³; 37,6%) y MCA-LAM3271-0011 (7,67 µg/m³; 35,9%), siendo el principal responsable de las concentraciones totales más altas registradas en la red (superiores a 21 µg/m³). Por otro lado, proyectos como LAM3199 muestran un impacto altamente focalizado, con un aporte del 22,3% (5,78 µg/m³) en MCA-LAM3199-0002, pero contribuciones insignificantes en el resto del área de estudio. En contraste, los aportes de LAM1203 y LAM2622 son sistemáticamente bajos en toda la red, rara vez superando el 1% de la concentración total, lo que evidencia que las superaciones o niveles de alerta en la zona dependen fundamentalmente de la interacción entre la elevada carga base (fondo) y las emisiones de la fuente de mayor impacto regional, LAM3271.

Tabla 10. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM_{2.5}

ID	Fondo		LAM0027		LAM1203		LAM1862		LAM2622		LAM3199		LAM3271		Concentración
	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	
MCA-LAM3199-0001	3,9	41,8%	0,58	6,2%	0,01	0,1%	0,47	5,0%	0,13	1,4%	0,64	6,9%	3,61	38,7%	9,34
ZM13 El Hatillo	3,9	42,5%	0,69	7,5%	0,01	0,1%	0,83	9,1%	0,10	1,1%	0,65	7,1%	3,00	32,7%	9,18
MCA-LAM3271-0011	3,9	43,5%	0,59	6,5%	0,01	0,1%	0,46	5,1%	0,12	1,3%	0,52	5,7%	3,38	37,7%	8,97
MCA-LAM1862-CAI02	3,9	44,1%	0,69	7,8%	0,01	0,1%	0,87	9,8%	0,09	1,1%	0,60	6,8%	2,68	30,3%	8,85
MCA-LAM0027-0001	3,9	44,5%	2,31	26,3%	0,01	0,1%	0,61	6,9%	0,10	1,1%	0,27	3,0%	1,58	18,0%	8,77
ZM20 Costa Hermosa	3,9	44,7%	0,57	6,6%	0,01	0,1%	1,94	22,3%	0,09	1,0%	0,32	3,6%	1,90	21,8%	8,72
ZM03 Loma 2	3,9	45,0%	0,61	7,0%	0,01	0,1%	2,24	25,8%	0,09	1,0%	0,22	2,5%	1,62	18,6%	8,67
MCA-LAM1862-CAI01	3,9	46,9%	0,61	7,3%	0,01	0,1%	1,91	22,9%	0,09	1,0%	0,21	2,5%	1,60	19,2%	8,31
MCA-LAM3271-0009	3,9	48,4%	1,59	19,7%	0,01	0,1%	0,04	0,5%	0,04	0,5%	0,02	0,2%	2,46	30,5%	8,06
MCA-LAM0027-0002	3,9	48,8%	1,58	19,7%	0,01	0,1%	0,04	0,5%	0,04	0,5%	0,02	0,3%	2,40	30,1%	7,99
MCA-LAM2622-0006	3,9	49,1%	0,47	5,9%	0,01	0,2%	0,09	1,1%	0,86	10,9%	0,13	1,6%	2,49	31,3%	7,95
MCA-LAM3271-0001	3,9	50,7%	0,13	1,7%	0,00	0,1%	0,03	0,4%	0,07	0,9%	0,03	0,3%	3,53	45,9%	7,69
ZM01 Loma Centro	3,9	54,4%	0,54	7,5%	0,01	0,1%	0,94	13,1%	0,07	0,9%	0,19	2,7%	1,52	21,2%	7,17
MCA-LAM2622-0005	3,9	56,3%	1,08	15,6%	0,02	0,3%	0,15	2,1%	0,13	1,9%	0,14	2,0%	1,51	21,8%	6,92
MCA-LAM3271-0002	3,9	59,4%	0,09	1,4%	0,01	0,1%	0,03	0,4%	0,05	0,8%	0,03	0,4%	2,45	37,4%	6,56
MCA-LAM3271-0008	3,9	61,0%	0,87	13,6%	0,01	0,2%	0,03	0,4%	0,01	0,2%	0,02	0,4%	1,55	24,2%	6,39
ZM05 La Aurora	3,9	61,5%	1,04	16,4%	0,01	0,1%	0,05	0,7%	0,04	0,7%	0,02	0,3%	1,29	20,3%	6,34
MCA-LAM0027-0003	3,9	62,8%	1,05	16,9%	0,02	0,3%	0,08	1,3%	0,08	1,3%	0,07	1,1%	1,02	16,3%	6,21
MCA-LAM3271-0012	3,9	75,0%	0,42	8,0%	0,01	0,2%	0,03	0,5%	0,02	0,3%	0,02	0,4%	0,80	15,5%	5,20



ID	Fondo		LAM0027		LAM1203		LAM1862		LAM2622		LAM3199		LAM3271		Concentración
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	
ZM06 Boquerón	3,9	75,5%	0,38	7,3%	0,02	0,5%	0,07	1,3%	0,08	1,5%	0,06	1,2%	0,65	12,6%	5,17
ZM22 Casacara	3,9	77,1%	0,07	1,4%	0,01	0,2%	0,02	0,5%	0,04	0,8%	0,02	0,4%	0,99	19,7%	5,06
ZM15 Chiriguana	3,9	82,5%	0,31	6,5%	0,01	0,1%	0,02	0,5%	0,02	0,4%	0,02	0,4%	0,45	9,6%	4,73
ZM04 La Palmita	3,9	82,6%	0,29	6,1%	0,04	0,8%	0,02	0,3%	0,02	0,4%	0,01	0,3%	0,45	9,5%	4,72
ZM19 Becerril	3,9	85,0%	0,13	2,8%	0,03	0,6%	0,01	0,3%	0,03	0,6%	0,02	0,4%	0,47	10,3%	4,59
ZM12 Rincon Hondo	3,9	87,4%	0,17	3,7%	0,01	0,3%	0,02	0,5%	0,01	0,2%	0,01	0,3%	0,34	7,6%	4,46
ZM02 Jagua Centro	3,9	89,0%	0,08	1,7%	0,24	5,4%	0,01	0,2%	0,00	0,1%	0,01	0,2%	0,15	3,4%	4,38
ZM09 Jagua Vía	3,9	89,5%	0,08	1,8%	0,18	4,2%	0,01	0,2%	0,01	0,1%	0,01	0,2%	0,17	4,0%	4,36
ZM21 La Victoria	3,9	97,7%	0,01	0,3%	0,04	1,0%	0,00	0,0%	0,00	0,0%	0,00	0,1%	0,03	0,8%	3,99

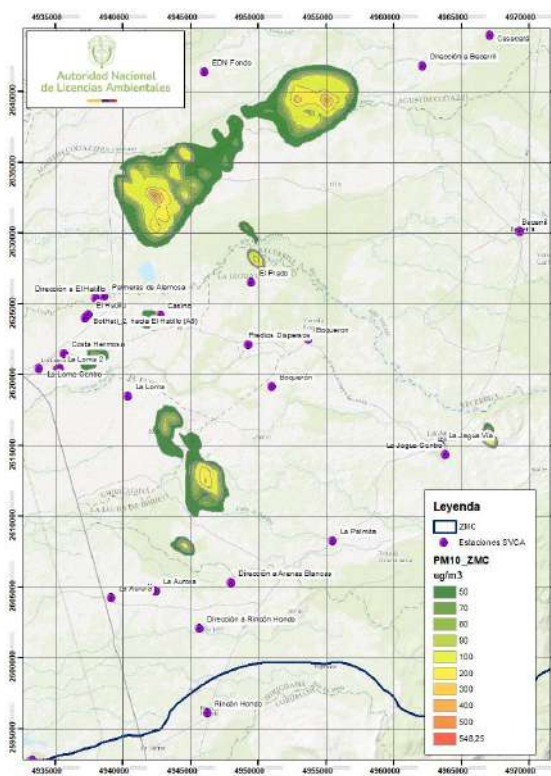
Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

Para el análisis detallado de $\text{PM}_{2,5}$, se identifica que la concentración de fondo continúa siendo el componente dominante en el escenario evaluado, aportando un valor constante de $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en todos los puntos de monitoreo. Esta carga base representa desde un 41,8% de la concentración total en el receptor MCA-LAM3199-0001, hasta un abrumador 97,7% en la estación ZM21 La Victoria. En relación con los proyectos evaluados, LAM3271 se posiciona como la fuente de mayor influencia regional, generando las contribuciones individuales más altas con valores de $3,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (38,7%) en el receptor MCA-LAM3199-0001 y $3,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (45,9%) en la estación MCA-LAM3271-0001, siendo este proyecto el principal responsable de impulsar las concentraciones totales máximas de la red hasta los $9,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Paralelamente, proyectos como LAM0027 y LAM1862 evidencian impactos considerables, pero geográficamente más acotados, destacándose el aporte del 26,3% ($2,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) del proyecto LAM0027 en el receptor MCA-LAM0027-0001, y el 25,8% ($2,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) generado por LAM1862 en la estación ZM03 Loma 2. En contraste, las emisiones de los proyectos LAM1203, LAM2622 y LAM3199 mantienen un perfil bajo o estrictamente localizado en la mayor parte del área de estudio, siendo especialmente marginal el caso de LAM1203, lo cual ratifica que la dinámica espacial de este contaminante obedece fundamentalmente a la interacción entre el nivel de fondo regional y la amplia dispersión de las emisiones del proyecto LAM3271.

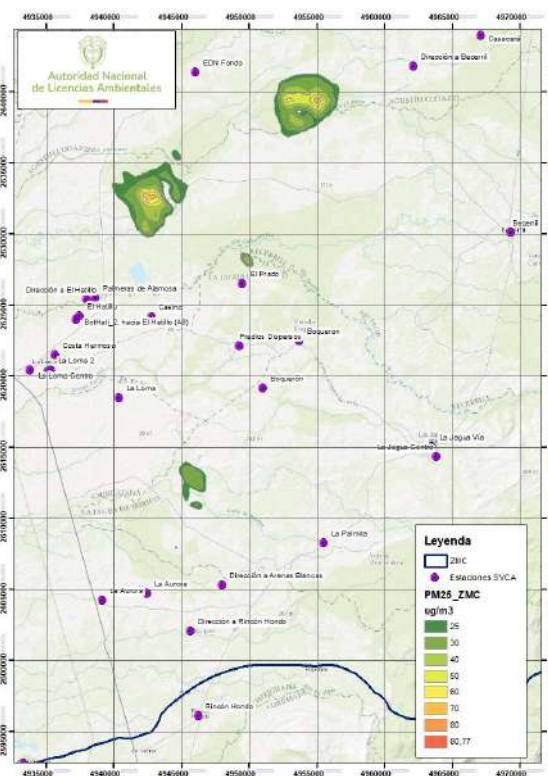
En complemento al análisis, las isopletras obtenidas para los dos escenarios y los dos contaminantes (Figura 21) ilustran espacialmente lo descrito previamente. Los resultados muestran un comportamiento dual de la dispersión en el territorio. Por una parte, la mayoría de los proyectos (LAM0027, LAM1862, LAM2622 y LAM3199) generan impactos altamente localizados, con aportes significativos restringidos al entorno inmediato de sus operaciones y contribuciones marginales en el resto de la red. Por otra parte, las emisiones del proyecto LAM3271 presentan un radio de dispersión espacial amplio, contribuyendo de forma sostenida en receptores distantes y actuando como carga base regional. En consecuencia, los valores acumulativos máximos no derivan de una superposición homogénea de todas las plumas, sino de la coincidencia, en receptores específicos, entre esa carga base regional del LAM3271 y los aportes locales de los proyectos contiguos, como se observa en MCA-LAM3199-0002 y MCA-LAM3199-0001.



Isoplelas PM₁₀ – Promedio Anual



Isoplelas PM_{2.5} – Promedio Anual



Fuente: ANLA - SIPTA, a partir del informe de modelación regional ZMCC. ANLA, 2026

Figura 21. Isoplela de PM₁₀ y PM_{2.5} - Tiempo de exposición anual para la ZMCC (año 2023).

Para evaluar la representatividad de la modelación en la Zona Minera del Cesar y conocer los impactos acumulativos, se contrastaron las estimaciones del modelo con los datos del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SEVCA) de CORPOCESAR correspondientes al año 2024. A partir del análisis detallado (Tablas 9 y 10), se concluye lo siguiente:

- Comportamiento del PM₁₀: Al integrar los aportes netos de los proyectos con la concentración de fondo establecida (11,00 µg/m³), las concentraciones totales estimadas en los receptores oscilaron entre 11,74 µg/m³ (estación ZM21 La Victoria) y un máximo de 25,91 µg/m³ (receptor MCA-LAM3199-0002). Estas magnitudes confirman el cumplimiento normativo en toda la red, manteniéndose holgadamente por debajo del límite anual de 50 µg/m³ y sin registrar excedencias. El análisis evidencia que la calidad del aire está dominada por la concentración de fondo, la cual representa entre el 42,4% y el 93,7% de la concentración total en la región.
- Comportamiento del PM_{2.5}: De manera similar, los valores totales proyectados (incluyendo el fondo de 3,9 µg/m³) se movieron en un rango estrecho, desde 3,99 µg/m³ hasta 9,34 µg/m³ (MCA-LAM3199-0001), evidenciando aportes de baja magnitud que cumplen estrictamente con el límite permisible anual de 25 µg/m³. La carga ambiental base condiciona el escenario aportando entre el 41,8% y el 97,7%



del total. En ambos contaminantes, el proyecto LAM3271 se consolida como el aportante de mayor influencia y dispersión regional.

Al realizar la evaluación estadística y comparativa entre los resultados de la modelación y los datos reales medidos en las estaciones del SEVCA y del SVCA tipo industrial, se observan diferencias significativas y errores porcentuales amplios (79,2% en PM_{10} y 73,4% en $PM_{2.5}$).

Sin embargo, es fundamental aclarar que los valores modelados en este análisis comparativo representan exclusivamente los aportes aislados de los proyectos evaluados, sin incluir la concentración de fondo regional. En contraste, las mediciones obtenidas en campo reflejan la carga ambiental total (aportes de los proyectos + concentración de fondo + fuentes externas no inventariadas).

Asimismo, se puede asociar a factores como la representatividad espacial y temporal de la información utilizada como entrada en el modelo, incluyendo variables como la meteorología modelada mediante WRF y la topografía satelital SRTM1 con resolución de 30 metros, así como a los criterios estadísticos empleados para estimar la concentración de fondo, las limitaciones inherentes al modelo de dispersión AERMOD y las incertidumbres propias de las estaciones de monitoreo que utilizan equipos manuales, entre otros aspectos.

En síntesis, el ejercicio de modelación aporta elementos para la evaluación de los impactos acumulativos del componente atmosférico en la ZMCC. Los resultados indican que, al integrar la concentración de fondo regional, las concentraciones totales estimadas en los receptores se mantienen por debajo de los límites anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 (valores máximos de $25,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $9,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$, frente a límites de 50 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente), sin que se identifiquen excedencias. El análisis de aportes permite reconocer los receptores donde la contribución conjunta de los proyectos resulta comparativamente mayor, entre ellos MCA-LAM3199-0002, MCA-LAM3199-0001, MCA-LAM3271-0011 y ZM13 El Hatillo, ubicados en el sector norte y centro del área.

Estos resultados guardan coherencia con lo observado en el análisis de las mediciones de calidad del aire, en el cual las estaciones con mayores aportes modelados coinciden, en términos generales, con aquellas que registraron las concentraciones medidas más altas y una menor proporción en la categoría “Buena” del ICA, particularmente en el entorno de El Hatillo y La Francia. Se observa, asimismo, que la estación ZM01 Loma Centro, identificada entre las de mayor concentración en las mediciones, presenta una concentración total modelada ($16,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10}) considerablemente inferior al promedio anual medido en 2024 ($42,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esta diferencia indica que el aporte de los proyectos evaluados representa una fracción reducida de las concentraciones registradas en dicha estación, y es consistente con su carácter de estación de fondo urbano y tráfico, lo que sugiere que las concentraciones allí medidas se asocian en mayor medida a fuentes diversas presentes en la zona, distintas de las actividades objeto de seguimiento. En conjunto, los resultados confirman condiciones de cumplimiento normativo y, a la vez, ofrecen información útil para orientar las actividades de seguimiento hacia los receptores donde la contribución de los proyectos evaluados resulta comparativamente mayor.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como del comportamiento meteorológico en la Zona Minera del Centro del Cesar entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de diciembre de 2025, permitió establecer las siguientes conclusiones:

- Representatividad de los datos: Los proyectos LAM0027, LAM1862, LAM2622, LAM3199 y LAM3271 reportan, una representatividad temporal adecuada ($\geq 75\%$) para los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el periodo comprendido entre 2021 a 2025. A excepción del primer año de puesta en marcha del SVCAI del LAM1862 y LAM3199, considerando que iniciaron finalizando el 2024. Adicionalmente, para los registros del SVCAI de CORPOCESAR, para el PM_{10} se registraron representatividades superiores al 90% en los últimos tres años (2023-2025).
- Cumplimiento de los límites normativos: El análisis de las concentraciones anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante el periodo 2021–2025 evidencia un cumplimiento general de los valores límite establecidos en la Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 ($50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$). Si bien respecto a los promedios anuales no se presentaron excedencias, sí se identificaron concentraciones cercanas al umbral permisible de PM_{10} , para el caso de las estaciones del SVCAI de CORPOCESAR ZM01 Loma Centro, ZM03 La Loma, ZM13 El Hatillo y ZM20 Costa Hermosa; y de $PM_{2.5}$, en ZM01 Loma Centro. Los resultados de los proyectos ANLA en el marco de la estrategia de monitoreo registraron concentraciones más bajas a las registradas por el SVCAI de CORPOCESAR
- Variabilidad mensual y estacional: El análisis mensual de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el periodo comprendido entre 2021 y 2025 muestra una variabilidad interanual y estacional. Si bien, no se registraron concentraciones promedio mensuales que excedan el límite permisible, si se determinaron episodios puntuales de concentraciones elevadas en las estaciones de monitoreo ZM01, ZM03, ZM12, ZM13 y ZM20 del SVCAI de CORPOCESAR, para el primer trimestre de cada año, alcanzando valores cercanos o superiores a $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, asociado a mayor resuspensión por época seca y episodios esporádicos (especialmente quemas). A nivel interanual entre 2023 a 2025, en las estaciones ZM01, ZM13 y ZM20 se evidenciaron picos recurrentes de concentraciones de $PM_{2.5}$, sin que estas excedieran el límite normativo. Para el año 2025, en la mayoría de las estaciones se aprecia una ligera reducción o estabilización de las concentraciones mensuales.
- Análisis diario y comportamiento estadístico: El análisis de las series de tiempo diarias permite evidenciar que, los picos de concentración no son continuos, sino que corresponden a eventos aislados o de corta duración. Comportamiento que sugiere una influencia de factores episódicos. La mayoría de las estaciones evaluadas mantienen sus medianas por debajo de los valores límite normativos diarios



establecidos por la Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$). Las estaciones ZM01, ZM20 y ZM13 presentan medianas más elevadas y mayor dispersión, lo que sugiere una mayor presión por fuentes emisoras. En contraste, las estaciones ZM02, ZM04 y varias estaciones de expedientes ANLA (MCA-LAM) presentan concentraciones con menor variabilidad, a diferencia del LAM3199 y LAM3271, los cuales evidencian incrementos en la dispersión de datos en 2023 y 2024.

- Condiciones meteorológicas: Las condiciones meteorológicas durante el año 2025 evidencian un predominio de bajas velocidades del viento ($0\text{--}2 \text{ m/s}$ y $2\text{--}4 \text{ m/s}$), lo que favorece escenarios de estabilidad atmosférica y, por tanto, una limitada dispersión de contaminantes. Aunque se presentan eventos con velocidades superiores a $4\text{--}6 \text{ m/s}$, estos son menos frecuentes y de carácter puntual, asociados a una mayor capacidad de transporte de contaminantes a escala regional.
- Patrones por dirección del viento y hora del día: El análisis conjunto de la dirección del viento y la variación horaria muestra que, al igual que en 2024, las concentraciones más bajas de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ se registran durante la madrugada y primeras horas de la mañana (0 a 8 horas), desde la mayoría de las direcciones. Posteriormente, se presentan incrementos progresivos a partir de las 8:00 horas, alcanzando valores más altos principalmente en horas de la tarde (alrededor de las 14:00 a 18:00 horas) para PM_{10} , y en horas nocturnas y de madrugada para $\text{PM}_{2.5}$. En cuanto a la dirección, se identifican aportes relevantes desde el noreste y este, aunque sin una única dirección dominante en toda el área.
- Comportamiento de estaciones cercanas y representatividad: Las estaciones ubicadas dentro de un mismo proyecto o en zonas cercanas presentan, en general, comportamientos consistentes en términos de tendencias temporales y direccionales, lo que respalda la representatividad espacial de la red de monitoreo. No obstante, se observan variaciones puntuales entre estaciones, atribuibles a la influencia de fuentes locales, como vías sin pavimentar o actividades específicas cercanas, así como a condiciones microclimáticas particulares.
- Relación entre concentración y velocidad del viento: Se evidencia que las mayores concentraciones de material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) se presentan bajo dos escenarios: (i) bajas velocidades del viento, que favorecen la acumulación local de contaminantes, y (ii) velocidades altas ($>4\text{--}6 \text{ m/s}$) asociadas principalmente a direcciones noreste y este, lo que sugiere el transporte de contaminantes desde fuentes lejanas. En este sentido, los resultados indican que la calidad del aire en el área de estudio está influenciada tanto por fuentes locales como regionales, donde actividades de mayor escala, como las mineras, pueden incidir en las concentraciones registradas.



- Ciclos temporales y actividad antrópica: El análisis de los ciclos temporales del PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante 2025 en la zona minera del Centro del Cesar evidencia una relación directa entre las concentraciones de material particulado y las dinámicas operativas y meteorológicas, reflejada en incrementos durante días hábiles y horas pico (mañana y tarde-noche), así como en periodos secos, y disminuciones en fines de semana, madrugadas y temporadas lluviosas; este comportamiento es más pronunciado en PM_{10} , lo que confirma la incidencia de fuentes fugitivas de origen mecánico, mientras que el $PM_{2.5}$ presenta menor variabilidad, sugiriendo aportes más regionales o secundarios, lo cual permite identificar periodos críticos para el fortalecimiento de medidas de control y optimización de estrategias de seguimiento ambiental.
- Índice de la calidad del Aire (ICA): Para PM_{10} durante el año 2025 muestra que la gran mayoría de las estaciones de monitoreo mantienen condiciones calificadas como "Buenas", con 22 de las 29 estaciones evaluadas registrando más del 90 % de sus datos en esta categoría. Este resultado indica que, en términos generales, la exposición poblacional a partículas respirables gruesas representa un riesgo bajo para la salud en el contexto regional. Sin embargo, se identifican estaciones con proporciones significativas de tiempo en la categoría "Aceptable", siendo las más representativas ZM20 Costa Hermosa (28,9%), ZM01 Loma Centro (28,7%), ZM13 El Hatillo (25,4%) y ZM03 Loma 2 (23,3%), todas pertenecientes al SEVCA-ZMC de CORPOCESAR. Estas condiciones, aunque no implican riesgos graves inmediatos, representan una señal de alerta sobre posibles fuentes locales o situaciones meteorológicas particulares que influyen en las concentraciones registradas. Adicionalmente, la estación ZM01 Loma Centro registró un 0,8 % de días en la categoría "Dañina a la salud de grupos sensibles", lo que requiere atención continúa debido al potencial riesgo para poblaciones vulnerables como personas con enfermedades respiratorias, niños y adultos mayores residentes en esas zonas.
- El análisis del Índice de Calidad del Aire (ICA) para $PM_{2.5}$ en el año 2025 evidencia un escenario más crítico en comparación con PM_{10} , ya que una mayor proporción de estaciones presenta registros en categoría "Aceptable" e incluso se detectan episodios en las categorías "Dañina a la salud de grupos sensibles" y "Dañina para la salud". En particular, estaciones como ZM20 Costa Hermosa (55,6%), MCA-LAM1862-CAI01 (53,0%), ZM13 El Hatillo (46,3%) y ZM09 Jagua Vía (44,3%) registran las mayores fracciones de tiempo en la categoría "Aceptable". Asimismo, ZM20 Costa Hermosa (1,6%), MCA-LAM3199-0002 (0,7%) y MCA-LAM1862-CAI01 (0,9%) reportan proporciones de tiempo en la categoría "Dañina a la salud de grupos sensibles", y las dos últimas son también las únicas estaciones en registrar episodios en la categoría "Dañina para la salud", lo que señala la presencia de eventos puntuales que pueden afectar la salud de poblaciones vulnerables. Aunque estaciones como MCA-LAM0027-0001, MCA-LAM0027-0002, MCA-LAM3271-0001, entre otras, conservan porcentajes superiores al 90 % en la categoría "Buena", el comportamiento de las estaciones con



peor desempeño (ZM13 El Hatillo, ZM20 Costa Hermosa, MCA-LAM3199-0002 y MCA-LAM1862-CAI01) refleja una mayor frecuencia de concentraciones elevadas que requieren seguimiento prioritario e intensificación de las medidas de manejo orientadas a la reducción de las emisiones de $PM_{2.5}$.

- Actuaciones Judiciales y procesos sancionatorios: Con base en la verificación efectuada en el Sistema de Información de Licencias Ambientales (SILA), no se identifican procesos sancionatorios, ni actuaciones judiciales vigentes asociados al componente atmosférico, específicamente en materia de calidad del aire, para la Zona Minera del Centro del Cesar.
- Modelo de dispersión regional: los resultados de la modelación regional indican que la concentración total estimada de PM_{10} (aportes de proyectos más concentración de fondo) osciló entre $11,74 \mu g/m^3$ (estación ZM21 La Victoria) y $25,91 \mu g/m^3$ (receptor MCA-LAM3199-0002), mientras que la de $PM_{2.5}$ se ubicó entre $3,99 \mu g/m^3$ (ZM21 La Victoria) y $9,34 \mu g/m^3$ (receptor MCA-LAM3199-0001). En todos los receptores evaluados, las concentraciones totales se mantuvieron por debajo de los límites anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 ($50 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $25 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$), sin registrar excedencias. El escenario está dominado por la concentración de fondo, que representa entre el 42,4% y el 93,7% del total para PM_{10} , y entre el 41,8% y el 97,7% para $PM_{2.5}$, lo que indica que el aporte neto de los proyectos licenciados es de baja magnitud frente a la carga ambiental base de la región.
- En el ejercicio de validación, que contrasta los aportes modelados de los proyectos frente a las mediciones del SEVCA de CORPOCESAR (año 2024), los errores porcentuales oscilaron mayoritariamente entre el 1% y el 80%. Esta dispersión es esperable en un modelo de alcance regional y se explica, en buena parte, porque los valores modelados representan únicamente el aporte de las fuentes licenciadas por la ANLA, mientras que las mediciones en campo capturan la carga ambiental total (proyectos, fondo y fuentes externas no inventariadas, como vías sin pavimentar, quemas e incendios). Se identificó un caso atípico puntual en el que el modelo sobreestimó la concentración medida, comportamiento asociado a condiciones micrometeorológicas locales, a la cercanía del receptor a las fuentes de emisión y a las incertidumbres propias del modelo AERMOD, sin que ello altere la conclusión general de cumplimiento normativo en la red.
- El análisis espacial de las isopletras de PM_{10} y $PM_{2.5}$ permite establecer que los impactos acumulativos se concentran principalmente en los sectores norte y centro de la región, asociados a los aportes de las minas El Hatillo, La Francia, El Descanso, Similoa y Rincón Hondo. En consecuencia, las medidas de control y reducción de emisiones atmosféricas contempladas en los Planes de Manejo Ambiental de cada



proyecto deben aplicarse con rigor para mantener bajos los niveles de inmisión, y el seguimiento a través del Sistema de Información de Licencias Ambientales (SILA) resulta esencial para validar su cumplimiento y orientar las acciones pertinentes.

- Los resultados de la modelación respaldan la ubicación de las estaciones definidas en la estrategia de monitoreo de la ANLA en la ZMCC, dado que se localizan en áreas con aportes que requieren de seguimiento continuo al ser atribuibles a expedientes específicos y, a la vez, en entornos representativos de las condiciones de calidad del aire de la zona.
- Impactos acumulativos: La modelación regional de dispersión evidencia la existencia de impactos acumulativos del componente atmosférico en la ZMCC, materializados en la superposición espacial de los aportes de los proyectos LAM0027, LAM1862, LAM2622, LAM3199 y LAM3271, sin que ello implique superación de los límites normativos anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017.
- El proyecto con expediente LAM3271 se configura como la fuente de mayor influencia regional, actuando como el proyecto que aporta de manera sostenida el incremento en las concentraciones en la mayoría de los receptores de la red, mientras que los demás proyectos (LAM0027, LAM1862, LAM2622, LAM3199) presentan un impacto más localizado espacialmente, concentrado en el entorno inmediato de sus operaciones.
- La concentración de fondo regional ($11,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $3,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$) representa entre el 42,4% y el 93,7% (PM_{10}) y entre el 41,8% y el 97,7% ($\text{PM}_{2.5}$) de la concentración total registrada en los receptores. Esto indica que, si bien existen impactos acumulativos atribuibles a los proyectos mineros licenciados, estos son de magnitud comparativamente menor frente a la carga ambiental base de la región, asociada a otras fuentes como vías sin pavimentar; y quemas de biomasa y residuos.
- Los receptores con mayor contribución acumulada modelada coinciden, en términos generales, con las estaciones que históricamente han registrado las concentraciones medidas más altas y menor proporción en categoría "Buena" del ICA, lo que, valida cualitativamente la capacidad del ejercicio de modelación para identificar zonas de mayor sensibilidad ambiental, pese a las limitaciones cuantitativas del modelo.
- En consecuencia, existen impactos acumulativos identificables y atribuibles a la interacción entre proyectos mineros de la ZMCC, principalmente en el sector norte-centro del área de análisis, los cuales ameritan seguimiento continuo, sin que actualmente representen una condición de incumplimiento normativo o riesgo crítico para la salud de la población.



RECOMENDACIONES

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se identifica la pertinencia de actualizar la información base asociada a las fuentes emisoras en la Zona Minera del Centro del Cesar (ZMCC), en la medida en que las dinámicas operativas, productivas y territoriales de la zona pueden haber experimentado variaciones significativas en el tiempo. En este sentido, se sugiere que CORPOCESAR adelante el levantamiento de un nuevo inventario de emisiones, como herramienta fundamental para mejorar la representatividad y confiabilidad de los insumos técnicos utilizados en la evaluación de la calidad del aire; además de lo establecido por medio de la Resolución 858 de 2026 frente al fortalecimiento del monitoreo y ejecución de modelaciones anuales.

La actualización de este instrumento permitiría fortalecer los procesos de seguimiento, control y toma de decisiones en la ZMCC, así como garantizar una adecuada interpretación de los aportes de las diferentes fuentes emisoras en el territorio. Asimismo, contribuiría a la articulación de estrategias de gestión de la calidad del aire basadas en información actualizada, consistente y acorde con las condiciones reales de operación de los proyectos presentes en la zona.

En caso de mantenerse los niveles actuales de emisión y contaminación atmosférica, existe el riesgo de que los límites de calidad del aire establecidos a 2030 en la Resolución 2254 de 2017 se excedan, dado que para el último periodo analizado el 34,4% de las estaciones superarían el límite permisible de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y el 10,5% de las estaciones excederían el límite de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$. Por lo que se recomienda la adopción oportuna de medidas orientadas a la reducción de emisiones y el mantenimiento del sistema monitoreo permanente, con el fin de prevenir posibles escenarios de incumplimiento normativo a futuro.

Finalmente, para el desarrollo de las siguientes versiones de esta modelación se recomienda contemplar:

- a. La configuración del modelo Aermol las condiciones de terreno (modelo digital de elevación) ajustado a la topografía de los proyectos mineros para disminuir la incertidumbre en el fenómeno de dispersión.
- b. Referente al inventario de emisiones, se establece que los expedientes integran sus medidas de manejo y control de emisiones atmosféricas las cuales deben mantener para garantizar que el nivel de inmisión sea bajo como se identificó en esta modelación y se refleja en el SEVCA de CORPOCESAR.



6. BIBLIOGRAFÍA

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA (2026). Sistema de Información de Licencias Ambientales (SILA). Bogotá, D.C.

CORPOCESAR (2026). Informes de operación del Sistema Especial de Vigilancia de Calidad del Aire de CORPOCESAR. Informes anuales 2021 a 2025. Disponibles en: <https://monitoreo.gndelectronics.com/app/dashboards/public/dashboard/8Fj73LKVgOznRwmEsEtaXGPE-0agch4iCx BjMEm1buY?navbar=true&contextbar=false>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS), 2017. Resolución 2254 de 01 de noviembre de 2017. Norma de Calidad de Aire de Ambiente. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS), 2010. Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Resolución 651 de 2010 y Resolución 2154 de 2017. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

R Core Team (2024). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE. Disponible en: <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>



7. ANEXOS

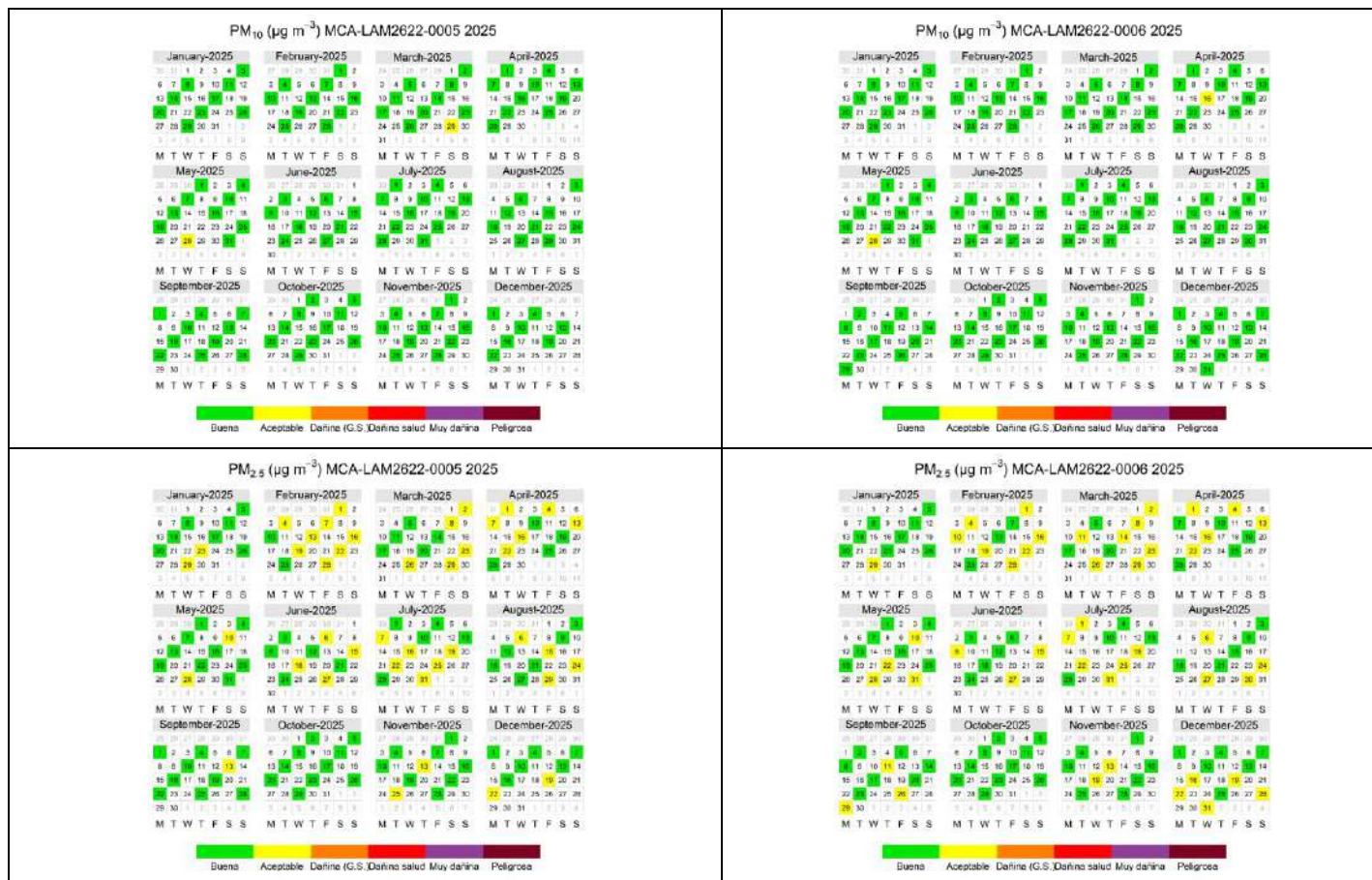
7.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA ESTACIÓN DE MONITOREO DEL AÑO 2025

7.1.1. Expediente LAM0027





7.1.2. Expediente LAM2622

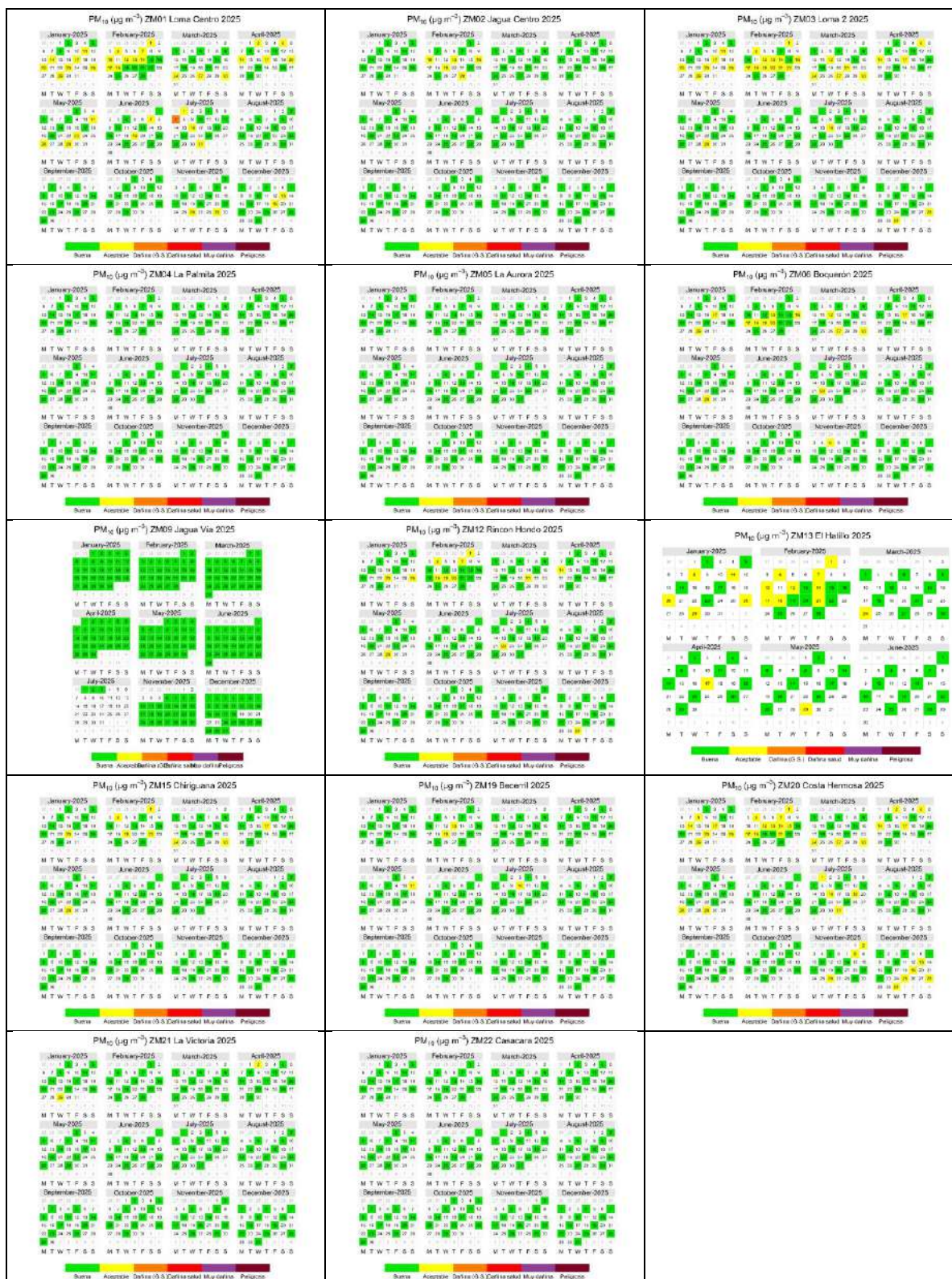


7.1.3. Expediente LAM3271





7.1.4. SEVCA ZMC – CORPOCESAR: PM10



Fuente: ANLA – SIPTA, a partir de los datos del SEVCA ZMC CORPOCESAR en SISAIRE, 2026

Figura 22. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM10 – SEVCA ZMC CORPOCESAR

7.1.5. SEVCA ZMC – CORPOCESAR: PM_{2.5}



Fuente: ANLA – SIPTA, a partir de los datos del SEVCA ZMC CORPOCESAR en SISAIRE, 2026

Figura 23. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM_{2.5} – SEVCA ZMC CORPOCESAR