



Autoridad Nacional
de Licencias Ambientales

INFORME DEL ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES:

ANÁLISIS DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LOS SVCA FIJOS EN EL ÁREA DE LA ESTRATEGIA ATMOSFÉRICA DEL ALTO SAN JORGE CÓRDOBA, COLOMBIA (2021 – 2025)

***Aplicación de la Fase IV de la estrategia de monitoreo: análisis
de información***

**JUNIO
2026**

Irene Vélez Torres
Directora 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
Análisis 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
Jorge Leguizamon Arevalo
Jaime Andrés Fajardo Rodríguez
William Pabón
German Leonardo Figueroa Pulido
Profesionales
Componente atmosférico



CONTENIDO

1	GLOSARIO (SIGLAS)	7
2	INTRODUCCIÓN	8
3	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO	10
3.1	CONDICIONES DE LUGAR.....	10
3.2	CONDICIONES DE TIEMPO	12
3.3	CONDICIONES DE MODO.....	13
4	ANÁLISIS REGIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE	14
4.1	INFORMACIÓN ANALIZADA	14
4.2	RESULTADOS SVCA.....	16
4.2.1	Análisis históricos de material particulado.....	16
4.2.2	Comportamiento de la velocidad y de la dirección del viento	25
4.2.3	Análisis conjunto de concentraciones de material particulado con el comportamiento del viento	31
4.2.4	Análisis de ciclos temporales.....	37
4.2.5	Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA.....	40
4.2.6	Actuaciones judiciales y procesos sancionatorios asociados al componente atmosférico en el área de la estrategia de monitoreo	45
4.3	MODELACIÓN DE LA DISPERSION DE MATERIAL PARTICULADO PM ₁₀ Y PM _{2.5}	46
4.3.1	Parametrización	46
4.3.2	Resultados.....	48
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6	BIBLIOGRAFIA	68
7	ANEXOS	69
7.1	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA ESTACIÓN	69
7.1.1	Expediente: LAV0002-00-2020	69
7.1.2	Expediente: LAV0052-00-2019	72
7.1.3	Expediente: LAM4656.....	74
7.2	ANÁLISIS CICLOS TEMPORALES – LAM4656	76



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférico	8
Tabla 2. Ubicación Proyectos del Alto San Jorge con obligaciones asociadas a la estrategia de monitoreo atmosférico de la ANLA	11
Tabla 3. Ubicación de las estaciones de calidad del aire que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica	11
Tabla 4. Cantidad de registros diarios de calidad del aire para Alto San Jorge.....	14
Tabla 5. Descripción general del Índice de Calidad del Aire - ICA	40
Tabla 6. Proyectos incluidos en modelación de Alto San Jorge.....	46
Tabla 7. Estadísticos Concentraciones anuales sobre receptores discretos – Escenario Actual.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de Alto San Jorge	12
Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM_{10}	17
Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de $PM_{2.5}$	18
Figura 4. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de PM_{10}	19
Figura 5. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de $PM_{2.5}$	20
Figura 6. Distribución de los promedios diarios de PM_{10}	22
Figura 7. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM_{10}	22
Figura 8. Distribución de los promedios diarios de $PM_{2.5}$	24
Figura 9. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$	25
Figura 10. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAM4656	26
Figura 11. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0052-00-2019	28
Figura 12. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0002-00-2020	30
Figura 13. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0002-00-2020	31
Figura 14. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025 – LAM4656	33



Figura 15. Gráficos polares horarios anuales para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2025 – LAM4656	33
Figura 16. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM ₁₀) en 2025 – LAM4656.....	34
Figura 17. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2025 – LAM4656.....	34
Figura 18. Gráficos polares horarios anuales para las estaciones de calidad del aire (PM ₁₀) en 2025 – LAV0002-00-2020	35
Figura 19. Gráficos polares horarios anuales para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2025 – LAV0002-00-2020	36
Figura 20. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM ₁₀) en 2025 – LAV0002-00-2020	36
Figura 21. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM _{2.5}) en 2025 – LAV0002-00-2020	37
Figura 19. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire año 2025	40
Figura 20. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM ₁₀	42
Figura 21. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM _{2.5}	43
Figura 19. Comparación entre concentraciones modeladas y medidas de PM ₁₀ y PM _{2.5} en receptores sensibles.....	49
Figura 23. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM ₁₀ : Concentración (µg/m³) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.	51
Figura 24. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM _{2.5} : Concentración (µg/m³) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.	52
Figura 21. Isopleta de PM ₁₀ y PM _{2.5} - Tiempo de exposición anual para la ASJ (año 2024).	56
Figura 27. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM ₁₀ - LAV0002-00-2020	70
Figura 28. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM _{2.5} - LAV0002-00-2020.....	72
Figura 29. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM ₁₀ - LAV0052-00-2019	73
Figura 30. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM _{2.5} - LAV0052-00-2019.....	74
Figura 31. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM ₁₀ - LAM4656.....	74
Figura 32. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM _{2.5} - LAM4656	75
Figura 33. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2023.....	76

Figura 34. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2024.....	77
--	----



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.

PM2.5: 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).

ASJ Alto San Jorge.

NOTA: Cualquier contradicción que se presente con las definiciones incluidas en este documento y las definiciones previstas en normas vigente, prevalecerán últimas.





2 INTRODUCCIÓN

Este documento presenta el análisis de las concentraciones del periodo 2021 a 2025, de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, para evaluar el estado de la calidad del aire asociado a los proyectos que se encuentran reportando a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), bajo la **estrategia de monitoreo del componente atmosférico del Alto San Jorge**, ubicada en el departamento de Córdoba.

Los datos históricos de la calidad del aire referente a la **Estrategia de Monitoreo Atmosférico del Alto San Jorge**, considerados en este análisis se enmarcaron en el periodo comprendido del 1 de enero de 2021 al 31 de diciembre de 2025; se obtuvieron a partir de la información radicada por tres (3) proyectos, los dos primeros de la sociedad Cerro Matoso S.A. asociados con el sector minero y el tercero de la sociedad GECELCA S.A. relacionado con el sector de energía, que se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférico

EXPEDIENTE	TITULAR	PROYECTO	ACTO ADMINISTRATIVO QUE IMPONE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO
LAV0002-00-2020	CERRO MATOSO S.A.	Explotación y Transformación de Ferroníquel Cerro Matoso S.A.	Resolución 1878 del 23 de noviembre del 2020, que otorgó nueva Licencia Ambiental Global y Resolución 003107 del 27 diciembre del 2023, que efectuó ajuste vía seguimiento.
LAV0052-00-2019		Aprovechamiento de recursos minerales en los Cerros Queresas y Porvenir	Resolución 1622 del 23 de octubre del 2020, que otorgó la Licencia Ambiental.
LAM4656	Generadora y Comercializadora de Energía del Caribe S.A E.S.P. (GECELCA S.A.)	Construcción y Operación de una Central Térmica de Generación de Energía Eléctrica a Carbón	Resolución 1242 del 23 de julio del 2020, que efectuó ajuste vía seguimiento.

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026

Se revisó la información disponible en el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) del IDEAM, cubriendo el periodo del 1 de enero de 2021 al 31 de diciembre de 2025. Esta revisión permitió identificar la presencia de tres sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA) en la zona de estudio: Gecelca 3, LAV0002-00-2020 Explotación y Transformación de Ferroníquel Cerro Matoso S.A., y LAV0052-00-2019 Aprovechamiento de Recursos Minerales en los Cerros Queresas y Porvenir. Se verificó que las estaciones de monitoreo utilizadas por los sistemas denominados Gecelca 3 y LAV0052-00-2019 son las mismas que figuran en los expedientes de los proyectos previamente mencionados. Sin embargo, el sistema de vigilancia del LAV0002-00-2020 aún no reporta estaciones de monitoreo en el SISAIRE.



En consecuencia, el análisis de los datos se llevó a cabo con base en los resultados de las estaciones disponibles y la información de calidad del aire aportada por los tres proyectos implicados.

Conforme a todo lo anterior, en la Tabla 3 se relacionan las coordenadas de las estaciones con reportes de resultados de concentraciones de material particulado que hicieron parte del análisis; en la **Figura 1** se puede evidenciar la distribución espacial.

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 actualmente 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 cubren un total de 18 proyectos con obligaciones asociadas al monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Cabe precisar, que para el seguimiento y análisis del estado de la calidad del aire de las zonas donde se emplazan proyectos de control de la ANLA se cuenta con herramientas complementarias que brindan información del estado de la calidad del aire, entre ellas: tableros de control¹ y reportes de análisis regional².

Considerando que es la estrategia de monitoreo de Alto San Jorge la de objeto del actual análisis, a continuación, se precisan las condiciones de lugar, tiempo y modo del monitoreo de la calidad del aire para cada proyecto.

Es fundamental precisar que la presente estrategia de monitoreo no abarca las operaciones de otros sectores industriales que se desarrollan en la región. Esta exclusión se fundamenta en la ausencia de información por parte de esta Autoridad respecto a la calidad del aire de los Proyectos, Obras o Actividades cuya gestión y vigilancia recae en las Corporaciones Autónomas Regionales. Adicionalmente, no se identificaron Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) externos que pudieran integrar el análisis. Por consiguiente, la estrategia se restringe a los proyectos activos y bajo el seguimiento de la ANLA.

3.1 CONDICIONES DE LUGAR

Respecto a la zona del Alto San Jorge, a través de la presente estrategia de monitoreo se establecieron obligaciones y/o medidas para los proyectos con actividades asociadas con el sector minero y el sector energético que emplean combustibles fósiles. La Tabla 2 proporciona una lista de la ubicación municipal de los proyectos que forman parte de esta estrategia de monitoreo.

1 ANLA. Tablero de control para la Subzona Hidrográfica de Alto San Jorge – Córdoba. Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiMGZlZmZkLTQ5NzkyMGJmUxOCIsImMiOiR9>

2 ANLA. Reportes de Análisis Regional para la Subzona Hidrográfica de Alto San Jorge. Disponible en: <https://www.anla.gov.co/proyectos-anla/centro-de-monitoreo/reporte-de-alertas>

Tabla 2. Ubicación Proyectos del Alto San Jorge con obligaciones asociadas a la estrategia de monitoreo atmosférico de la ANLA

EXPEDIENTE	TITULAR	PROYECTO	MUNICIPIO – DEPARTAMENTO
LAM4656	GENERADORA Y COMERCIALIZADORA DE ENERGÍA DEL CARIBE S.A E.S.P. (GECELCA S.A.)	Construcción y Operación de una Central Térmica de Generación de Energía Eléctrica a Carbón	Puerto Libertador, en el departamento de Córdoba
LAV0002-00-2020	CERRO MATOSO S.A.	Explotación y Transformación de Ferroníquel Cerro Matoso S.A.	Montelíbano, Puerto Libertador y San José de Uré, en el departamento de Córdoba
LAV0052-00-2019	CERRO MATOSO S.A.	Aprovechamiento de recursos minerales en los Cerros Queresas y Porvenir	Planeta Rica, en el departamento de Córdoba

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026

De igual manera, se detallan las coordenadas de localización para las estaciones de monitoreo de calidad del aire de cada uno de los proyectos analizados en el marco de la presente estrategia de monitoreo (Tabla 3 y Figura 1).

Tabla 3. Ubicación de las estaciones de calidad del aire que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica

SVCA	ID ANLA	NOMBRE DE LA ESTACIÓN	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN ÚNICO NACIONAL	
			ESTE	NORTE
LAV0002-00-2020	MCA-LAV0002-00-2020-0001	Sajana	4722317.228	2430308.821
	MCA-LAV0002-00-2020-0002	Esmeralda	4715364.976	2434842.177
	MCA-LAV0002-00-2020-0003	Puente Uré (Reubicada)	4720824.259	2435249.936
	MCA-LAV0002-00-2020-0004	Pueblo Flecha	4718296.323	2430114.239
	MCA-LAV0002-00-2020-0005	Puerto Colombia	4723280.000	2430313.000
	MCA-LAV0002-00-2020-0006	La Odisea	4713561.882	2429694.524
	MCA-LAV0002-00-2020-0007	Centro América	4714161.121	2434836.305
	MCA-LAV0002-00-2020-0008	Bocas de Uré	4722833.120	2436468.526
	MCA-LAV0002-00-2020-0009	Torno Rojo	4718854.097	2439299.471
	MCA-LAV0002-00-2020-0010	San José de Uré	4721380.154	2419711.852
	MCA-LAV0002-00-2020-0011	Torno Roto	4719680.167	2435328.580
	MCA-LAV0002-00-2020-0012	Balsilla	4718886.135	2430331.716
	MCA-LAV0002-00-2020-0013 ³	Puente Uré II	4720859.130	2435306.311
LAV0052-00-2019	MCA-LAV0052-00-2019-0001	Medio Rancho	4710781.632	2479357.929
	MCA-LAV0052-00-2019-0002	Marañonal	4710311.611	2476830.833
	MCA-LAV0052-00-2019-0003	Guarica	4710584.000	2474691.200
	MCA-LAV0052-00-2019-0004	El Almendro	4707883.220	2479202.200
	MCA-LAV0052-00-2019-0005	El Guayabo	4709040.792	2476554.908
LAM4656	MCA-LAM4656-0001	Vientos Arriba	4714028.870	2440292.668
	MCA-LAM4656-0002	Vientos Abajo	4714140.123	2442540.347

³ Estación de calidad del aire reubicada en agosto del año 2025.

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026

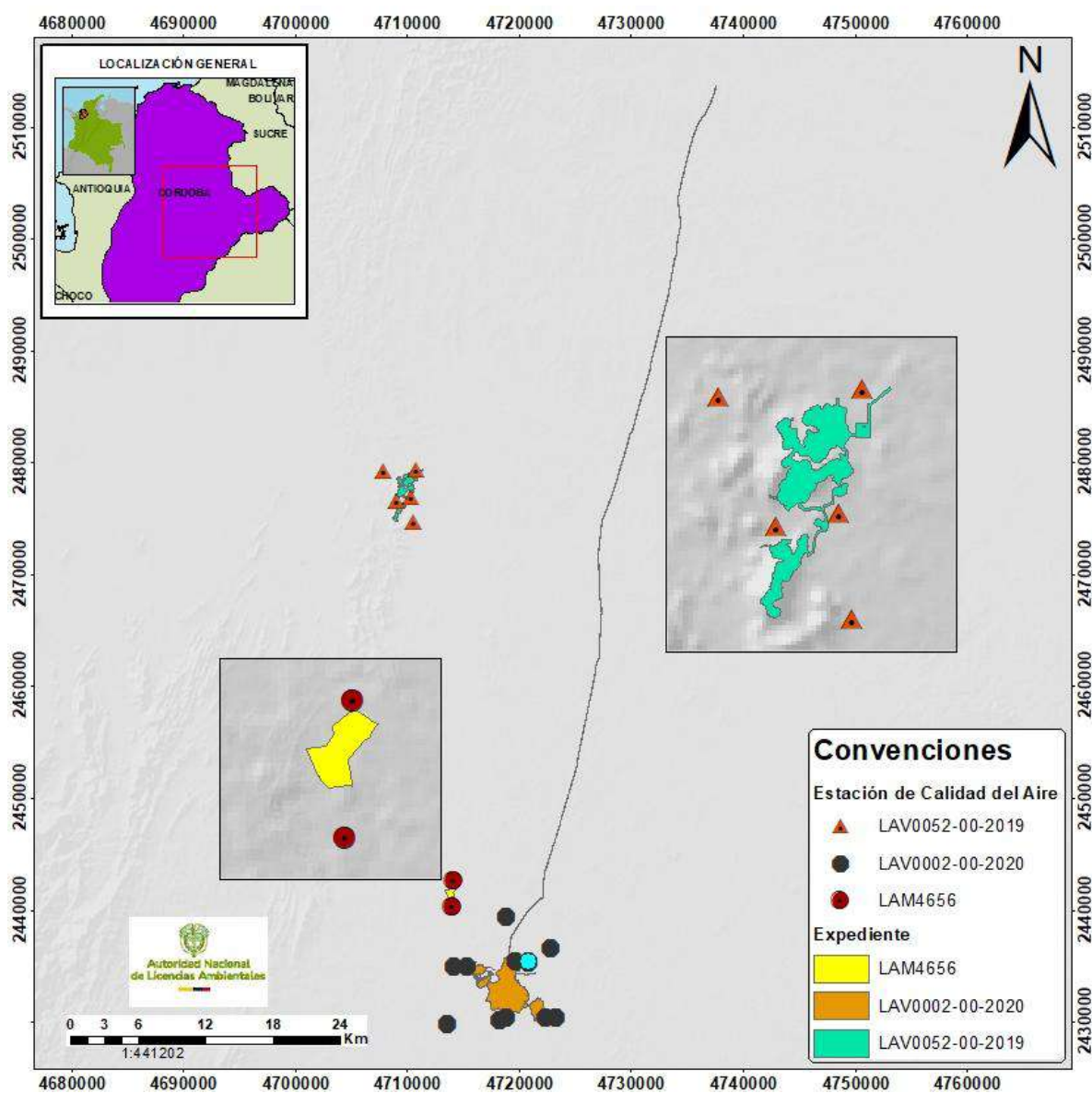


Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de Alto San Jorge

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026

3.2 CONDICIONES DE TIEMPO

El monitoreo es permanente con frecuencia de muestreo máximo horaria para muestreadores automáticos y cada tercer día en el caso de muestreadores manuales. Como mínimo deben reportarse registros de 24 horas, medidos desde medianoche hasta la medianoche del día siguiente conforme a lo establecido en el Manual de Diseño del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad de Aire, adoptado mediante

Resolución 650 de 2010⁴ y ajustado por la Resolución 2154 de 2010⁵, o aquella que modifique o sustituya.

Los resultados de las mediciones validadas de los contaminantes y variables meteorológicas deben ser remitidos a esta autoridad como reporte de monitoreo regional de manera semanal para el caso de estaciones automáticas y mensualmente para el caso de estaciones manuales. Adicionalmente, sin perjuicio de lo anterior y en línea con lo establecido en el Artículo 25⁶ de la Resolución 2254 de 2017⁷, 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 5° de la Resolución 651 de 2010⁸.

3.3 CONDICIONES DE MODO

Contaminantes y parámetros: Registro de los parámetros meteorológicos de temperatura del aire (°C), presión atmosférica (bar), humedad relativa (%), radiación solar (W/m²), precipitación (mm), velocidad del viento (m/s) y dirección del viento (°). Adicionalmente, se registran los niveles de concentración de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} a condiciones de referencia en µg/m³.

Metodología: El registro de las muestras y sus respectivos análisis deberán ser realizadas por empresas o laboratorios que se encuentren acreditadas por el IDEAM, en cumplimiento del artículo 2.2.8.9.1.5 del Decreto 1076 de 2015⁹.

Conforme a lo anterior, en el siguiente capítulo se precisan los análisis históricos que abarcan los años de 2021 a 2025, con el fin de determinar la tendencia del estado de la calidad del aire.

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

5 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”

6 ARTÍCULO 25. Migración de la información del estado de la calidad del aire al SISAIRE. Los SVCA operados por Autoridades Ambientales y los proyectos, obras o actividades que realicen monitoreo con una periodicidad permanente deberán migrar la información del estado de la calidad del aire medida al Subsistema de Información Sobre Calidad del Aire - SISAIRE, siendo responsabilidad de cada operador mantener su información actualizada y validada.

7 Resolución 2254 de 2017: “Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”

8 Resolución 651 de 2010: “Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRE”

9 Según el Parágrafo 2 del Artículo 2.2.8.9.1.5 del Decreto 1076 de 2015, establece que los laboratorios que produzcan información cuantitativa física, química y biótica para estudios o análisis ambientales deberán poseer una certificación de acreditación otorgada por el IDEAM.

4 ANÁLISIS REGIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE

4.1 INFORMACIÓN ANALIZADA

De acuerdo con la descripción de estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en la zona de la estrategia y expuestas en la Tabla 3 y en la Figura 1, a continuación, se analizan los resultados de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, junto con las variables meteorológicas cuyos datos se asocian a estas mediciones.

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 que pueden ser obtenidos en el año de evaluación, considerando que existe cumplimiento normativo si ésta supera el 75 % del total de datos que se pueden capturar en el año. El consolidado de registros diarios analizados por estación se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de registros diarios de calidad del aire para Alto San Jorge

EXPEDIENTE	AÑOS	PM ₁₀		PM _{2.5}	
		# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)	# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)
LAV0002-00-2020	2021	9	23 – 100	9	13 - 100
	2022	12	76 – 91	12	73 - 90
	2023	12	59 – 99	12	41 - 99
	2024	12	39 – 98	12	52 - 94
	2025	13*	28 – 100	13*	27 - 98
LAV0052-00-2019	2022	5	85 – 99	5	82 – 98
	2023	5	100	5	98 – 100
	2024	5	85 – 91	5	88 – 93
	2025	5	67 – 82	5	74 – 87
LAM4656	2022	2	42	2	42
	2023	2	93 – 96	2	93 - 96
	2024	2	100	2	100
	2025	2	99 – 100	2	99 - 100

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026

En el caso de las estaciones de monitoreo de calidad del aire del proyecto con expediente LAV0002-00-2020, se evidencia el traslado de la estación Puente Uré (MCA-LAV0002-00-2020-0003) sustentado en un análisis técnico de micro localización presentado a esta Autoridad Ambiental. Este ajuste al sistema se desarrolló con base en análisis técnicos y espacios de socialización con la comunidad indígena Puente Uré, quien aceptó la nueva ubicación. El equipo fue reubicado el 13 de agosto de 2025 y se asignó la nueva denominación Puente Uré

II (MCA-LAV0002-00-2020-0013). Lo anterior, fue reportado a esta Autoridad con la finalidad de formalizar el traslado de la estación y validar la información de calidad del aire generada desde la nueva ubicación, para efectos del seguimiento ambiental y cumplimiento de las obligaciones aplicables.

De acuerdo con la tabla anterior, la representatividad de los muestreos para material particulado ha sido variable y el cumplimiento se da para aquellas estaciones que superan el 75 % de representatividad según el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010 hoy MADS).

Se observa que para el expediente LAV0002-00-2020 se registran representatividades inferiores al 75 %, especialmente en el año 2021 donde se registró el valor más bajo con un 13%; esto considerando que en este periodo se dio inicio al monitoreo regional del SVCA de dicho expediente. Por otra parte, se evidencian representatividades inferiores al 60 % en los años 2022 al 2025, especialmente en las estaciones denominadas: Esmeralda (MCA-LAV0002-00-2020-0002) y Puerto Colombia (MCA-LAV0002-00-2020-0005), por causa de inconvenientes en la ejecución de los monitoreos debido a la presencia de bloqueos por parte de las comunidades aledañas al área del proyecto que impidieron el acceso. Igualmente, en el año 2025 se observa que la estación de monitoreo denominada (Puente Ure) fue trasladada en el mes de agosto, esto generó que dicha estación no alcanzara el 75% de los datos válidos en las dos ubicaciones reportadas.

Por otra parte, fue posible identificar algunas interrupciones temporales de las estaciones de monitoreo, asociado principalmente a fallas eléctricas u operativas del SVCA ajenas a la operación del proyecto. Por tanto, se observa que el sistema presenta una debilidad asociada a la representatividad de sus estaciones de monitoreo en este sistema de vigilancia. A pesar de estas incidencias, es importante destacar que varias de las estaciones de monitoreo cumplen con el porcentaje mínimo de validez para el registro de datos de PM10 y PM2.5 durante el periodo analizado.

En cuanto al expediente LAM4656, se observó una representatividad del 42 % en las estaciones de monitoreo durante 2022; este bajo porcentaje se relaciona con la instalación y el inicio del monitoreo del SVCA ese mismo año. Sin embargo, en los años subsiguientes (2023 al 2025) la representatividad superó el 75 %, evidenciando un adecuado manejo de la representatividad del sistema de vigilancia de este proyecto.

En el expediente LAV0052-00-2019, para sus primeros años de operación entre el 2022 al 2024, se muestra que su representatividad temporal mínima es superior al 80 %, permitiendo realizar sus análisis de cumplimiento y representación anual para su Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA). Sin embargo, se evidencia que para el año 2025 las estaciones (MCA-LAV0052-00-2019-0004 y MCA-LAV0052-00-2019-0005) reportan representatividades inferiores al 75%, lo que puede estar asociado a problemáticas propias de la ejecución del monitoreo como cortes eléctricos, fallas temporales de los equipos o dinámicas de la zona

como bloqueos de la comunidad; igualmente, puede ser consecuencia de la forma y la temporalidad en que se hace la entrega de datos por parte del proyecto.

4.2 RESULTADOS SVCA

4.2.1 Análisis históricos de material particulado

En el presente apartado se identifican los análisis históricos del material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, para los periodos anual, mensual y diario, por medio de diferentes representaciones.

Considerando los resultados generados en la Figura 2, se observa que en las veinte (20) estaciones del área de cubrimiento de la estrategia, se da cumplimiento al nivel máximo permisible anual, correspondiente a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el contaminante Material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), según la Resolución 2254 de 2017. Asimismo, no se identifican concentraciones que registren altos niveles, o que se encuentren cerca del incumplimiento normativo anual.

Por otra parte, se muestra que las mayores concentraciones de este contaminante se reportan en las estaciones de monitoreo de Cerro Matoso, correspondiente al expediente LAV0002-00-2020, sin una tendencia clara de incremento o disminución en las concentraciones de PM_{10} , lo cual, posiblemente se asocia a las dinámicas propias de las actividades mineras que se desarrollan en el área del proyecto.

En cuanto al expediente LAM4656, sus estaciones de monitoreo registran un comportamiento estable de los niveles de concentración de PM_{10} , con valores entre 10 y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, implicando que las fuentes de emisión cercanas no han presentado algún cambio considerable en su proceso operativo.

Por otro lado, todas las estaciones de monitoreo del expediente LAV0052-00-2019 presentan una tendencia de disminución en los últimos años, con el nivel más alto reportado en el año 2022 con $26,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Madroñal (MCA-LAV0052-00-2019-0002); Sin embargo, se observa una tendencia a la reducción de estas concentraciones reportadas en el periodo comprendido entre los años 2022 y 2025 con concentraciones que se acercan a los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que puede estar asociado a la efectividad en las medidas de manejo y control en el área donde se sitúa el proyecto y/o a condiciones meteorológicas favorables como el aumento de precipitaciones y vientos con mayor intensidad.



Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAV0056

Respecto al material particulado $PM_{2.5}$, como se observa en la Figura 3, se evidencia que en ninguna de las veinte (20), estaciones analizadas se presentaron excedencias del nivel máximo permisible anual de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera, no se identifican altos niveles de concentración que se encuentren cerca del incumplimiento normativo anual. Se aclara que en este periodo de análisis se reportó la reubicación de una estación de monitoreo en el SVCA del proyecto con expediente (LAV0002-00-2020) por lo que, esta área regionalizada cuenta con 19 estaciones. En este sentido, para este periodo en específico se reportaron (20) estaciones, debido que se analizó la información parcial de la estación que se reubicó (MCA-LAV0002-00-2020-0003- Puente Uré).

No obstante, se destaca que los promedios anuales más altos se presentaron para el proyecto de Cerro Matoso (LAV0002-00-2020) con promedios cercanos a los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la mayoría de sus estaciones de monitoreo. Las estaciones: MCA-LAV0002-00-2020-0012 - Balsilla, y MCA-LAV0002-00-2020-0010 - San José de Uré, tienden a presentar los mayores niveles de concentración, superando los $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los periodos 2021 y 2025 respectivamente.

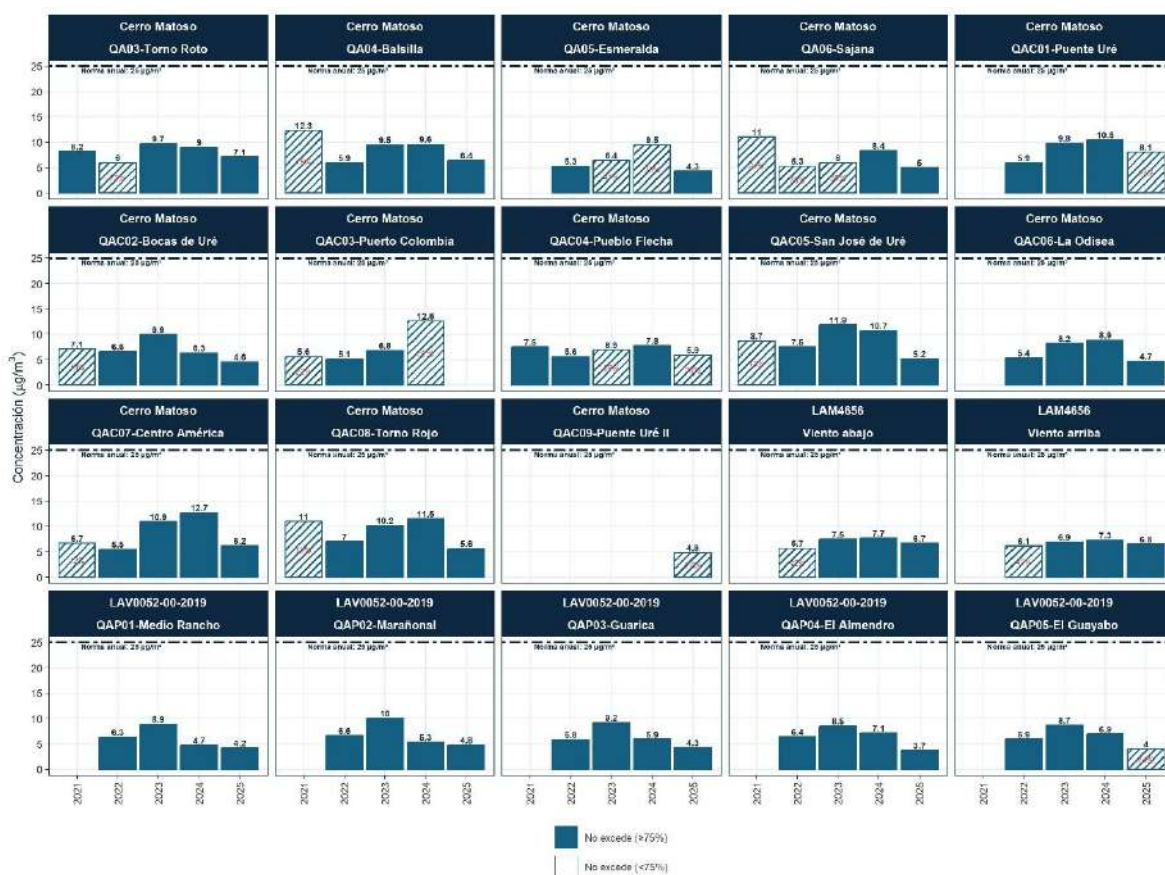


Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de $PM_{2.5}$

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

Por su parte, en el expediente LAM4656 sus estaciones de monitoreo registran niveles de concentración relativamente bajos y estables a lo largo del periodo en análisis, generalmente inferiores a los $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, las estaciones de monitoreo del expediente LAV0052-00-2019 presentan las concentraciones promedio más bajas de todo el conjunto de datos, con valores que pueden situarse entre $3,7$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En definitiva, si bien no hay una tendencia temporal única para todas las estaciones, algunas muestran aumentos de su nivel de concentración en el periodo comprendido entre los años 2022 y 2025. Este análisis evidencia la importancia del monitoreo continuo y localizado para comprender la dinámica de la calidad del aire y evaluar la efectividad de eventuales medidas de control de emisiones del material particulado fino.

En relación con la tendencia de los resultados mensuales de material particulado PM_{10} , a continuación, se presentan para cada estación los promedios históricos por mes (Figura 4).

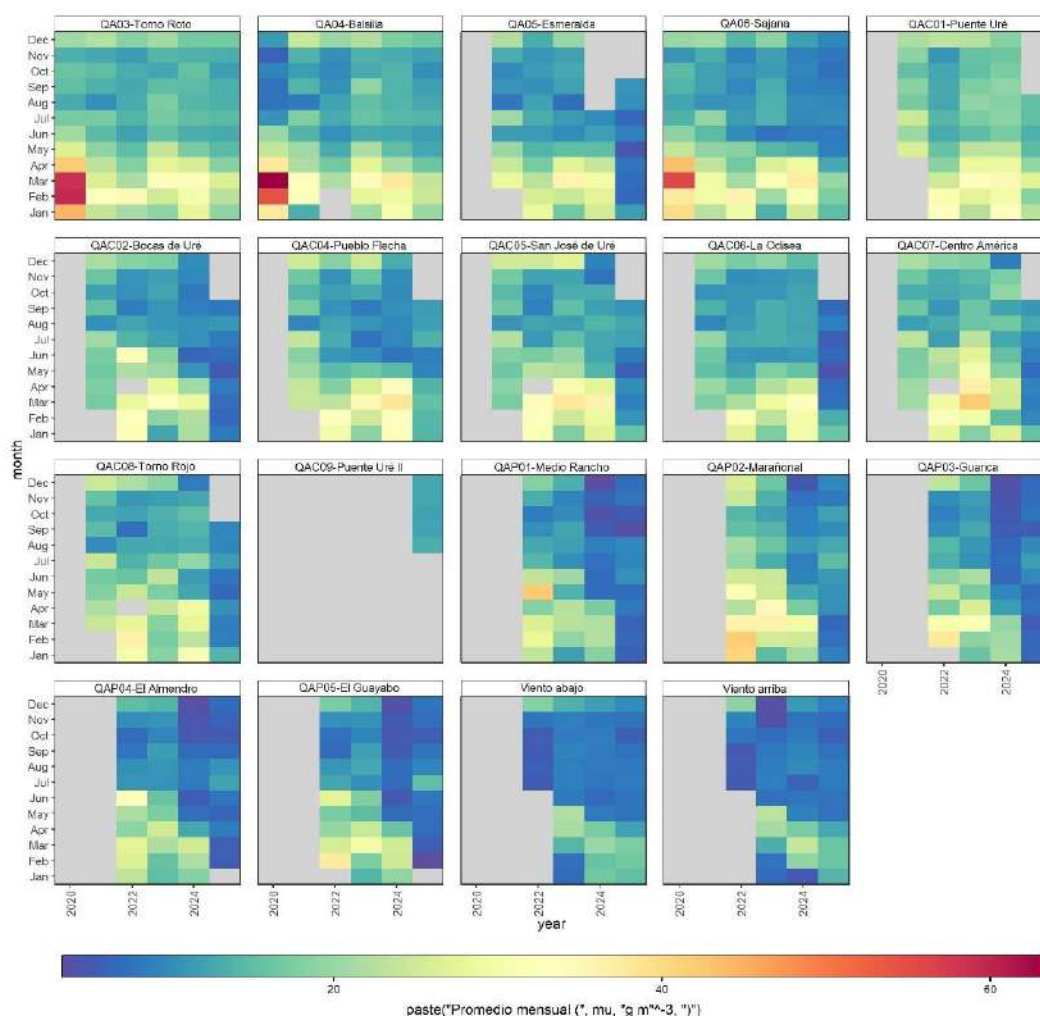


Figura 4. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

Como se observa en la figura anterior, los niveles de concentración más altos de material particulado suelen presentarse entre los meses de diciembre y abril, coincidiendo con la temporada seca o de bajas precipitaciones en la zona de estudio. No obstante, en los años 2024 al 2025 estos niveles se han atenuado durante dicho período, especialmente en las estaciones de monitoreo asociadas al expediente LAV0002-00-2020.

Sin embargo, se evidencia que durante y antes del año 2022 varias estaciones presentan periodos sin registro de información, situación asociada al inicio de operación de algunas estaciones, interrupciones en los monitoreos y criterios de entrega de resultados por parte del proyecto. Lo anterior afecta la representatividad de los datos disponibles en algunas estaciones de monitoreo.

Por el contrario, los valores mínimos se registran generalmente entre junio y noviembre, un período caracterizado por mayores precipitaciones y condiciones más húmedas en el área de estudio.

De acuerdo con lo anterior, es importante intensificar las medidas de manejo y control ambiental asociadas al material particulado durante los primeros meses de cada año. Esto puede asegurar una condición óptima en términos de calidad del aire en las diferentes estaciones de monitoreos de los diferentes sistemas de vigilancia de calidad del aire.

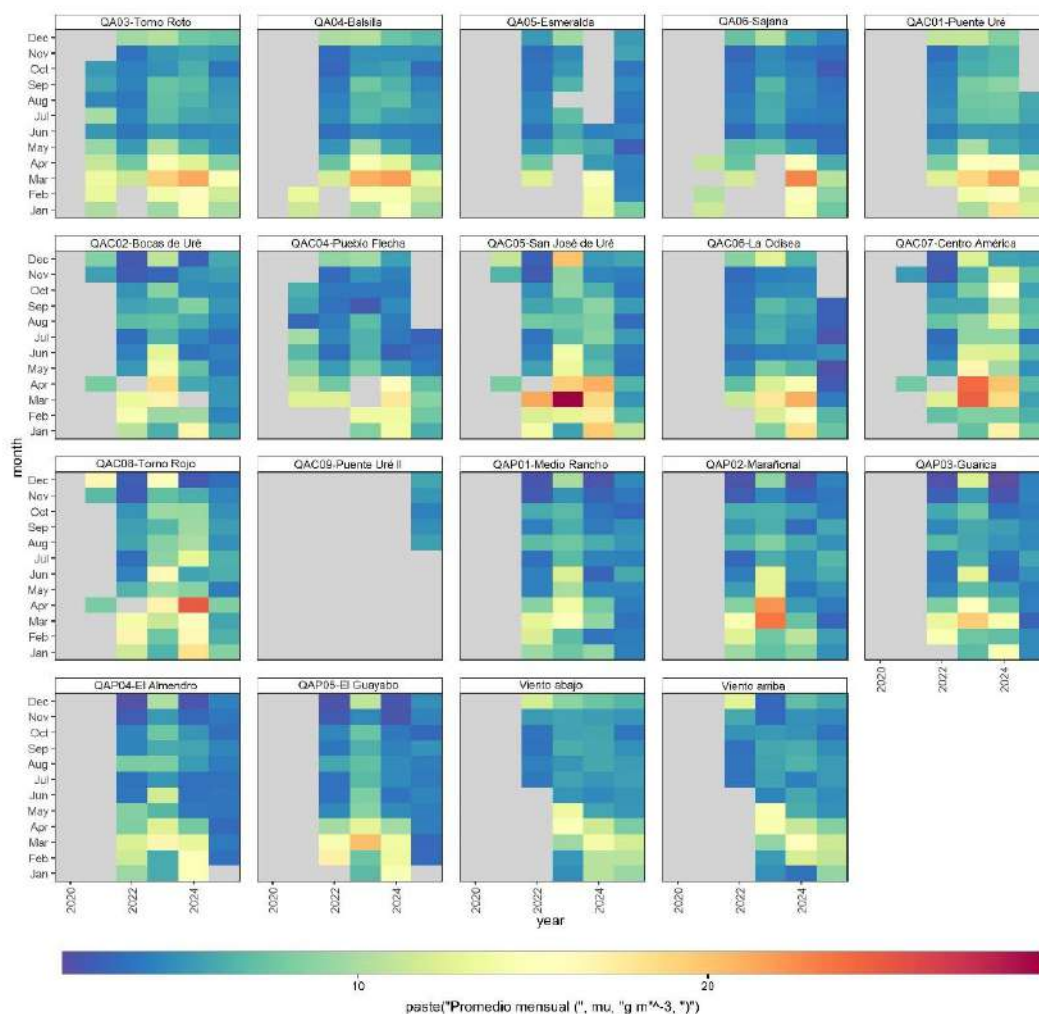


Figura 5. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de $PM_{2.5}$

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

De otra parte, de acuerdo con las tendencias mensuales de material particulado $PM_{2.5}$ expuestas en la Figura 5, las mismas son consistentes a lo presentado en las tendencias mensuales de PM_{10} . Se observa que las concentraciones más altas ocurren durante la época seca, que generalmente abarcan los meses de diciembre a abril. En contraste, los meses de

junio a noviembre, caracterizados por una mayor humedad e incremento de precipitaciones, presentan los niveles más bajos.

Al igual que los resultados de PM₁₀, se evidencia que varias de estas estaciones de monitoreo presentan espacios sin registro de información, esta situación se origina principalmente en el inicio de operabilidad de estas, las interrupciones de los monitoreos y los criterios de entrega de los resultados por parte del proyecto; situaciones que han afectado la representatividad de algunas estaciones de monitoreo.

En ese sentido, se identificó que en los años de 2023 y 2024 durante la temporada seca, se presentó un aumento de los niveles de concentración de PM_{2.5} en las estaciones de los expedientes LAV0002-00-2020 y LAV0052-00-2019 principalmente. Esta situación, probablemente se puede atribuir al inicio de las quemadas agrícolas o de biomasa en la región durante la temporada seca. Sin embargo, se identifica que estas concentraciones en el año 2025 presentan reducción. La Figura 6 y Figura 7, presentan el comportamiento diario de los niveles de concentración de PM₁₀, exponiendo su tendencia a través de diagramas de cajas y registros individuales diarios.

El análisis diario de percentiles, presentado en los diagramas de caja, revela que las medianas (percentil 50) en todas las estaciones y años estudiados se mantuvieron por debajo del límite máximo permisible de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Si bien la tendencia general indica cumplimiento de la mayoría de las estaciones; sin embargo, se registraron algunas excedencias puntuales en estaciones de los expedientes LAV0002-00-2020, con dos estaciones que registraron al menos un registro diario superando el límite de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (MCA-LAV0002-00-2020-0007 - Centro América y MCA-LAV0002-00-2020-0010 - San José de Uré). Lo anterior, también se evidencia en el proyecto con expediente LAV0052-00-2019, en los cuales se observan tres estaciones con registros máximos que superan el límite normativo diario (MCA-LAV0052-00-2019-0001 - Medio Rancho, MCA-LAV0052-00-2019-0004 - El Almendro y MCA-LAV0052-00-2019-0005 - El Guayabo). Estas excedencias, se reportan principalmente en el año 2022; sin embargo, estos se presentan como datos atípicos en el análisis de distribución general de los datos. Además, cabe destacar que en los años 2024 y 2025 no se registraron excedencias al límite máximo en un tiempo de exposición diario. No obstante, es necesario monitorear las tendencias futuras de los datos diarios e investigar las causas de posibles niveles elevados que puedan presentarse.

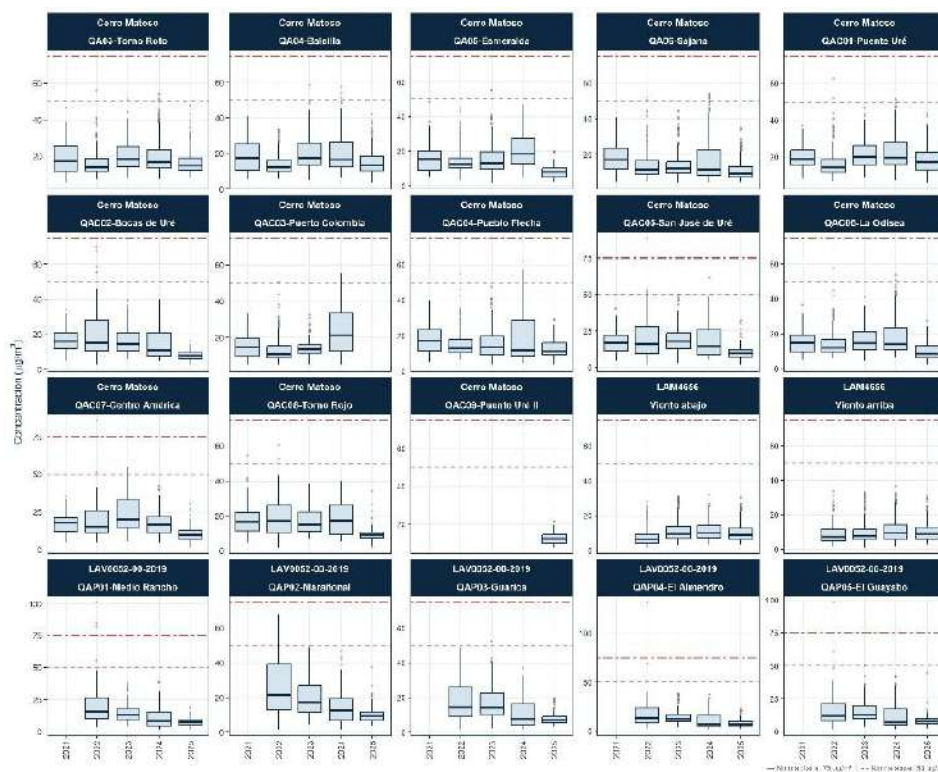


Figura 6. Distribución de los promedios diarios de PM₁₀

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

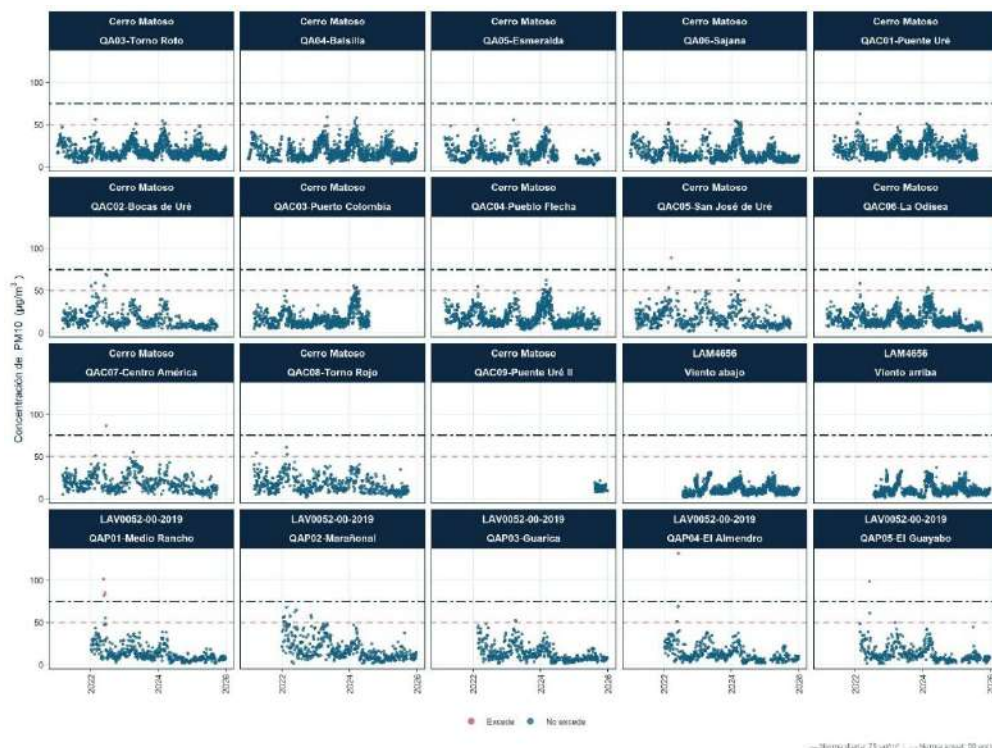


Figura 7. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM₁₀

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

De igual manera, la Figura 8 y Figura 9 presentan el comportamiento diario de los niveles de concentración de PM_{2.5}, representando su tendencia a través de diagramas de cajas y registros individuales diarios.

Respecto a las concentraciones de material particulado PM_{2.5}, los valores de las medianas (percentil 50) indican un cumplimiento normativo favorable en la mayoría de los registros. Sin embargo, se identificaron algunas excedencias del nivel máximo permisible de 37 µg/m³, establecido por la Resolución 2254 de 2017¹⁰. Es importante destacar que, de acuerdo con la distribución de los diagramas de caja, estas excedencias no son representativas del comportamiento general de la calidad del aire en la zona y se categorizan como datos atípicos.

Por otra parte, se identificaron que las concentraciones reportadas en el año 2025 presentan una tendencia menor en comparación con los años anteriores. No obstante, se recalca la necesidad de realizar un análisis riguroso de las causas puntuales asociadas con la ocurrencia de estos valores.

¹⁰ Artículo 2. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio. (...) Parágrafo 1: A partir del 1 de julio de 2018, los niveles máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} para un tiempo de exposición 24 horas serán de 75 µg/m³ y 37 µg/m³ respectivamente.



Figura 8. Distribución de los promedios diarios de $PM_{2.5}$

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

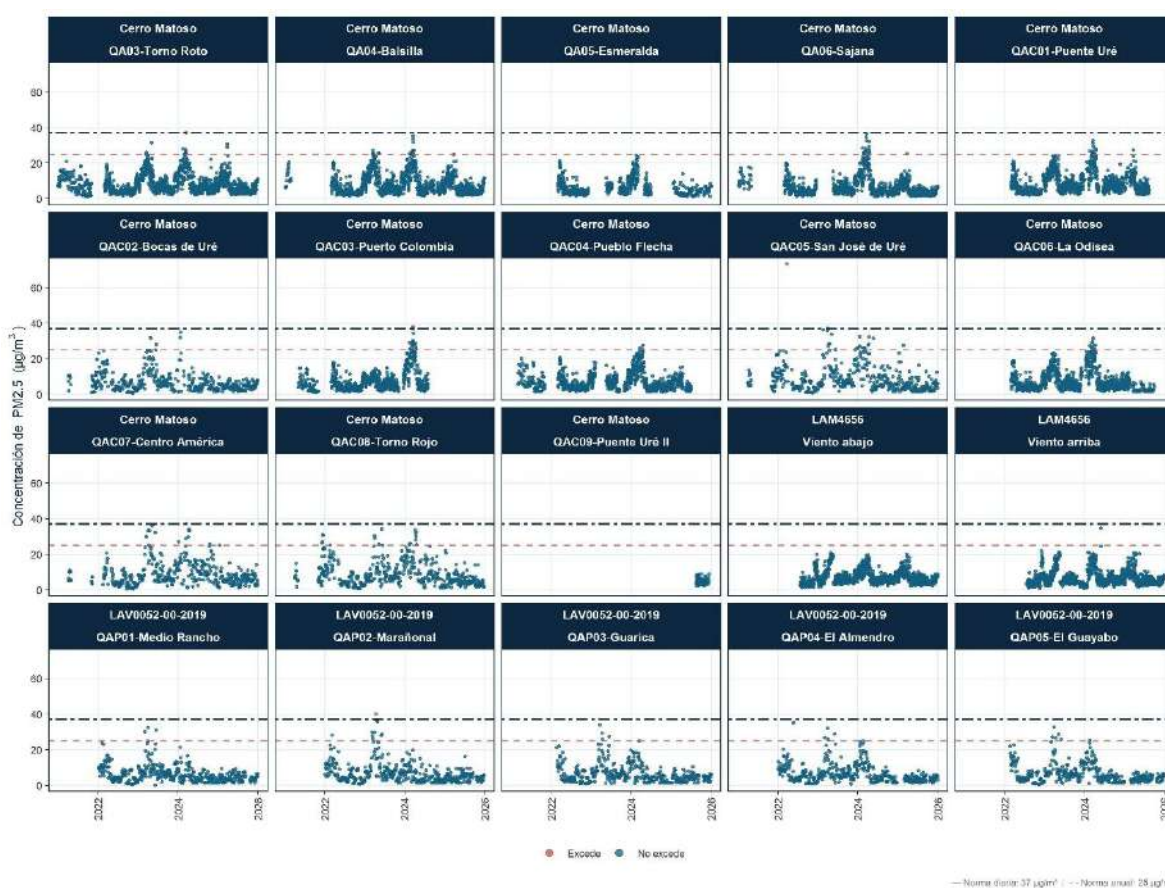


Figura 9. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

En general, la tendencia de los datos diarios muestra cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional. Sin embargo, se presentan algunas excedencias que pueden estar atribuidas a condiciones meteorológicas específicas y de la variabilidad del nivel de actividad de las fuentes de emisiones, las cuales no son representativas en relación con el conjunto global de datos analizados para el periodo 2021 al 2025.

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 horarios para el año 2025 de los tres (3) proyectos que reportaron a la estrategia de monitoreo. Las rosas de viento generadas corresponden a dos (2) para el proyecto LAM4656, cinco (5) para LAV0052-00-2019; y trece (13) para LAV0002-00-2020.

Respecto a las rosas de viento de las estaciones meteorológicas localizadas vientos arriba y vientos abajo del proyecto LAM 4656 (Figura 10), se evidencia un régimen de vientos de baja intensidad, con velocidades medias similares, del orden de 0,93 m/s vientos arriba y 1,04 m/s

vientos abajo. En ambas estaciones predominan velocidades entre 0 y 2 m/s, con aportes menores en el rango de 2 a 4 m/s y una ocurrencia muy baja o nula de velocidades superiores, lo cual indica condiciones atmosféricas caracterizadas por transporte lento y capacidad de dispersión moderada. Desde el punto de vista direccional, se observa que la estación localizada vientos arriba presenta una distribución más amplia, con predominio de flujos provenientes principalmente del sureste (SE) y sur (S), mientras que la estación vientos abajo muestra una dirección predominante mucho más marcada, asociada al cuadrante oeste-noroeste (WNW). Esta diferencia evidencia que el campo de vientos en el área del proyecto no es completamente homogéneo, posiblemente por efectos locales asociados a la topografía, cobertura del terreno, entre otros.

Adicionalmente se identificó que, en la mayor parte del periodo analizado existieron condiciones de circulación atmosférica con velocidades bajas. Lo anterior, considerando que las calmas reportadas en ambas estaciones tuvieron una frecuencia baja (0,1 % vientos arriba y 0 % vientos abajo).

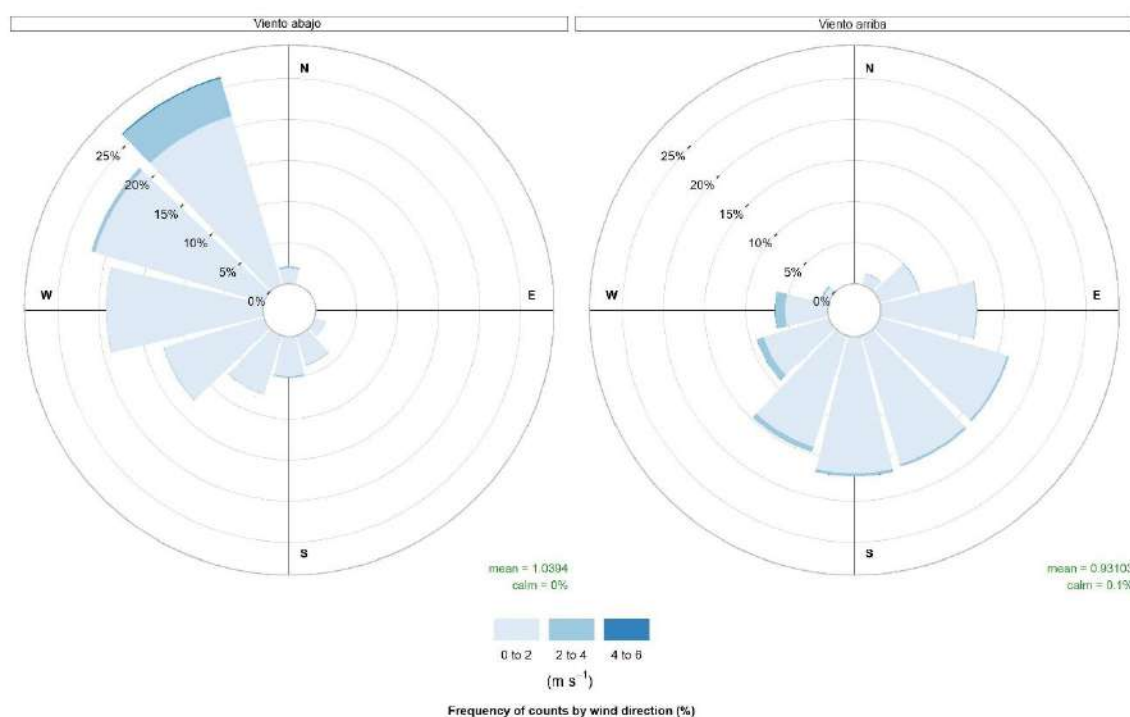


Figura 10. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAM4656

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

Respecto al comportamiento de los vientos asociado al proyecto LAV0052-00-2019 (Figura 11), las estaciones QAP01-Medio Rancho, QAP02-Marañonal y QAP03-Curinca presentan una alta recurrencia de vientos provenientes del sector oeste (W) y oeste-noroeste (WNW), alcanzando frecuencias superiores al 20 % e incluso cercanas al 40 % en algunos casos. Este comportamiento evidencia la existencia de un corredor predominante de circulación

atmosférica regional desde el occidente hacia el oriente, sugiriendo que gran parte del transporte de masas de aire en el área de influencia ocurre siguiendo dicho eje predominante. Por su parte, las estaciones QAP04-El Almendro y QAP05-El Guayabo muestran un patrón diferente. Así, en QAP04 predominan vientos provenientes del este-sureste (ESE) y sureste (SE), mientras que QAP05 registra una notoria preeminencia de vientos asociados al sur-suroeste (SSW). Estas diferencias indican, además que, dentro de la circulación regional predominante, existen efectos locales que modifican la dirección del flujo atmosférico, posiblemente asociados a la topografía, la configuración del relieve, la presencia de corredores naturales de viento o contrastes térmicos locales.

Respecto a la intensidad del viento, todas las estaciones muestran predominio de velocidades bajas, principalmente en el rango de 0 a 2 m/s, con una participación menor de velocidades entre 2 y 4 m/s y una ocurrencia muy reducida de velocidades superiores. Las velocidades medias oscilan aproximadamente entre 0,61 m/s y 1,76 m/s, siendo la estación QAP02-Marañón la que presenta la mayor velocidad promedio y QAP05-El Guayabo la menor.

Respecto a la frecuencia de calmas, mientras las estaciones QAP01, QAP02 y QAP03 presentan porcentajes relativamente bajos (entre 0 % y 3,3 %), las estaciones QAP04 y especialmente QAP05 registran valores más elevados, alcanzando aproximadamente 7,3 % y 23,6 %, respectivamente. Estas condiciones sugieren una circulación de los vientos en dichos sectores y; potencialmente, una mayor susceptibilidad de procesos de acumulación temporal de contaminantes bajo determinadas condiciones meteorológicas.

En términos generales los resultados muestran que el área del proyecto está influenciada por una circulación predominante desde el occidente hacia el oriente en gran parte de la zona, acompañada por patrones locales diferenciados en algunos sectores. La coexistencia de velocidades bajas, direcciones predominantes relativamente definidas y episodios de calma más frecuentes, en ciertas estaciones, sugiere que los procesos de dispersión atmosférica están fuertemente condicionados por factores locales.

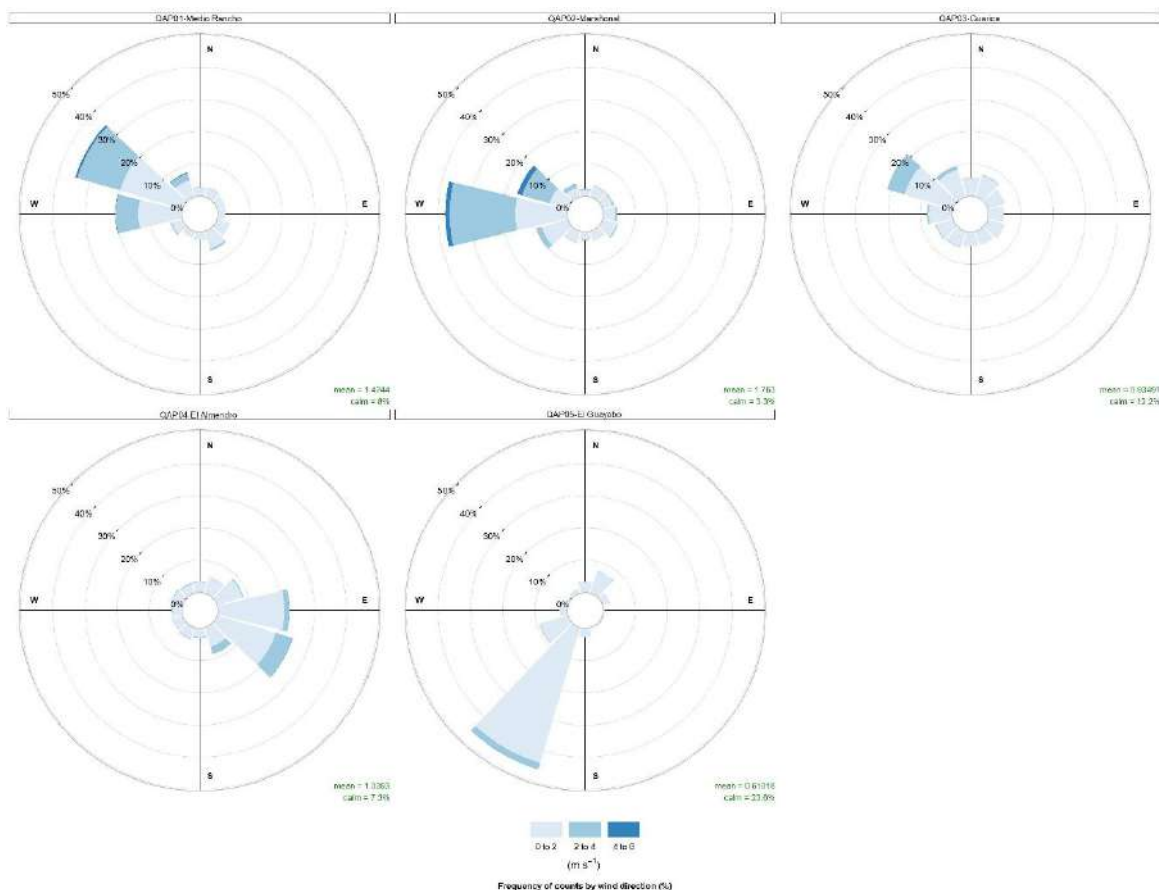


Figura 11. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0052-00-2019

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0052-00-2019

Frente al comportamiento de los vientos asociado al proyecto LAV0052-00-2019 (Figura 12Figura 13), se evidencia un régimen atmosférico caracterizado por una alta variabilidad espacial en la dirección del viento, aunque con una tendencia regional claramente influenciada por flujos provenientes de los cuadrantes occidental, noroccidental y norte, acompañados de velocidades predominantemente bajas a moderadas.

De manera general, la mayoría de las estaciones presentan una mayor frecuencia de ocurrencia de vientos asociados a los cuadrantes W, WNW, NW y NNW, patrón observable en estaciones como MT04-Portátil Mina, QAC01-Puente Uré, QAC02-Bocas de Uré, QAC05-San José de Uré, QAC07-Centro América, QAC08-Torno Rojo y QAC09-Puente Uré II. No obstante, algunas estaciones muestran comportamientos diferenciados. Particularmente, MT03-Portátil Mina y QAC06-La Odissea presentaron una distribución más amplia de direcciones, con aportes desde varios cuadrantes, mientras que QA03-Torno Roto evidenció una marcada influencia de vientos provenientes del sector sur-suroccidental. Asimismo, QAC04-Pueblo Flecha mostró un claro predominio de vientos asociados al cuadrante norte-noreste. Estas diferencias sugieren que el área de influencia del proyecto se encuentra sometida a efectos

meteorológicos locales asociados a la topografía y los patrones de circulación mesoescalares que modifican la dirección predominante observada a nivel regional.

Respecto a las velocidades del viento, en la mayoría de las estaciones prevalecen velocidades comprendidas entre 0 y 2 m/s, seguidas por el rango de 2 a 4 m/s, mientras que las velocidades superiores a 4 m/s presentan una participación reducida. Las velocidades medias registradas oscilan aproximadamente entre 0,41 m/s y 1,90 m/s, lo que indica condiciones de ventilación atmosférica generalmente moderadas. Las mayores velocidades medias se observan en estaciones como MT03-Portátil Mina ($\approx 1,90$ m/s) y QA06-Sajana ($\approx 1,43$ m/s), lo que sugiere una mayor capacidad de dispersión atmosférica en estos sectores. Por el contrario, estaciones como QAC07-Centro América ($\approx 0,41$ m/s), QAC01-Puente Uré ($\approx 0,65$ m/s), QAC02-Bocas de Uré ($\approx 0,69$ m/s) y QAC09-Puente Uré II ($\approx 0,71$ m/s) presentan velocidades medias considerablemente menores, indicando condiciones menos favorables para la dispersión de contaminantes.

La frecuencia de calmas registrada en las estaciones de monitoreo presentó un comportamiento heterogéneo. Mientras que en las estaciones MT03, QA06, QAC06 y QAC08 los porcentajes fueron inferiores al 5 %, en las demás se observaron valores considerablemente más altos. En particular, se destacaron las estaciones QAC07-Centro América (28,4 %), QA06-Sajana (23,8 %), QAC01-Puente Uré (19,6 %), QAC09-Puente Uré II (19,1 %), MT02-MEP (17,8 %), QA03-Torno Roto (16,2 %) y MT04-Portátil Mina (16,1 %).

Las anteriores condiciones indican que la dispersión atmosférica dentro del área de influencia del proyecto LAV0052-00-2019, no responde a un único patrón regional, sino a la interacción entre procesos de escala regional y efectos locales de terreno. Adicionalmente, los resultados sugieren una capacidad de dispersión variable dentro del área de estudio, con sectores con mayor flujo del viento y otros potencialmente más propensos a la acumulación atmosférica de contaminantes, particularmente durante periodos caracterizados por bajas velocidades del viento y condiciones de calma. .

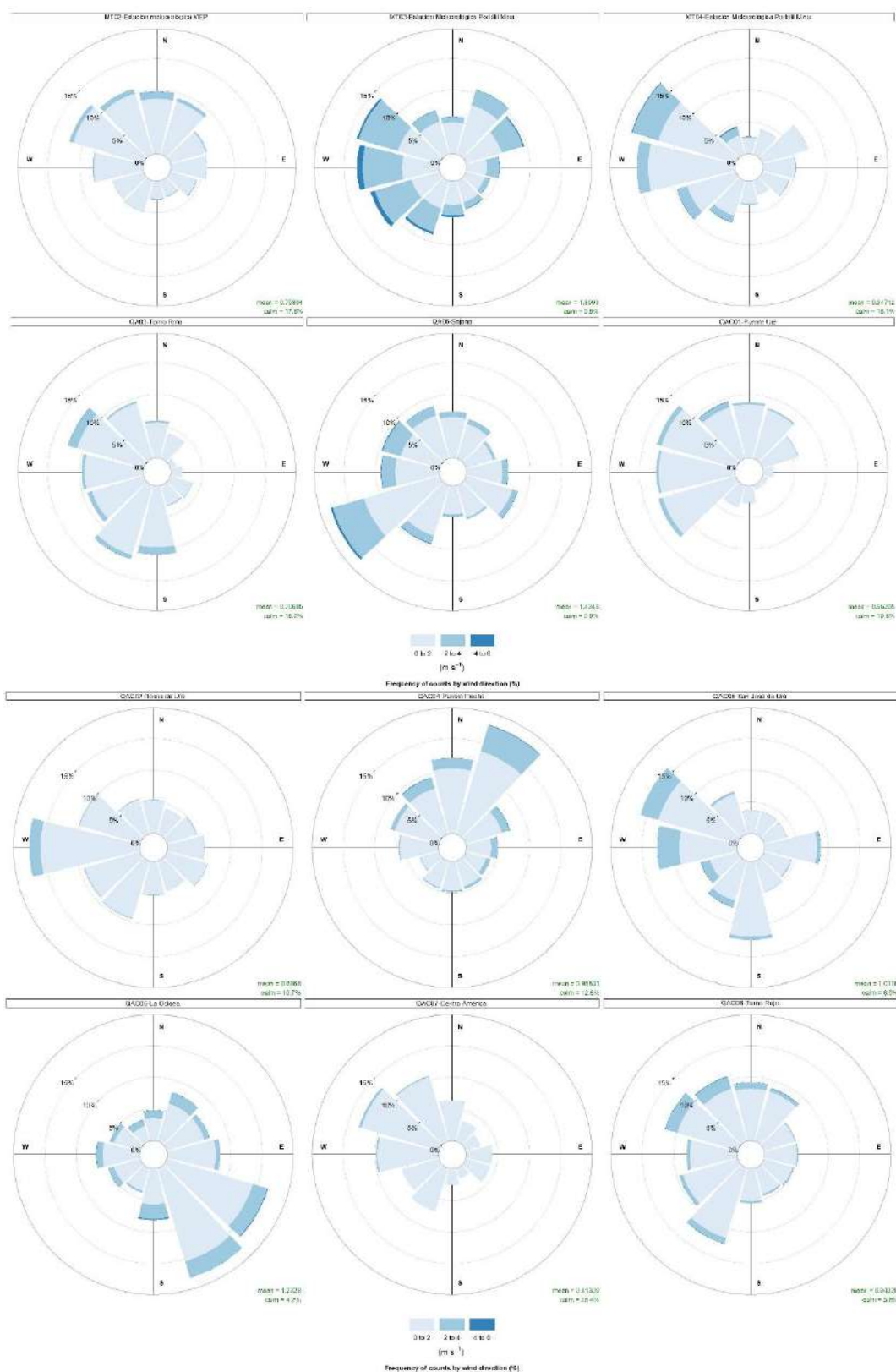


Figura 12. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0002-00-2020



Figura 13. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0002-00-2020

En términos regionales y considerando la información analizada anteriormente, se observa un predominio de vientos asociados a los cuadrantes occidental y noroccidental, acompañados de velocidades generalmente bajas y una variabilidad espacial influenciada por las condiciones locales del terreno. Estas características evidencian una capacidad de dispersión atmosférica heterogénea en la región, donde los patrones de transporte de contaminantes están determinados tanto por la circulación regional como por efectos meteorológicos y topográficos de escala local.

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

Con el objetivo de profundizar el análisis de tendencias de concentración, se llevó a cabo un cruce en los datos correspondientes a los horarios de concentración registrados durante el año 2025 con la información correspondiente a la dirección del viento y la hora del día. Este enfoque permite identificar patrones temporales y espaciales en la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Como resultado, se generaron gráficos polares anulares, que permiten visualizar simultáneamente la variación horaria de las concentraciones y su relación con la dirección del viento. Estos gráficos son especialmente útiles para detectar fuentes emisoras

recurrentes, así como para comprender cómo las condiciones meteorológicas influyen en la distribución de los contaminantes a lo largo del día.

A partir del análisis de los gráficos polares anulares correspondientes al año 2025, se identificaron patrones espaciales y temporales relevantes en las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, los cuales se analizan a continuación.

Respecto de los resultados representados por medio de los gráficos polares anulares y polares de concentración para PM_{10} y $PM_{2.5}$ del proyecto LAM4656 (Figura 14 a la Figura 17) se evidencia un comportamiento relativamente consistente entre ambos contaminantes, con mayores concentraciones asociadas principalmente a vientos provenientes de los cuadrantes occidental y noroccidental, tanto en la estación localizada vientos abajo como en la estación localizada vientos arriba. Este patrón indica que las masas de aire procedentes de dichos sectores tienen una influencia relevante sobre los niveles de material particulado registrados en el área de análisis.

Para PM_{10} , los gráficos muestran concentraciones más altas y espacialmente más extendidas, con valores que se intensifican principalmente bajo direcciones de viento del oeste, noroeste y, en algunos casos, norte. En la estación vientos abajo, las mayores concentraciones se concentran hacia el cuadrante noroccidental, mientras que en la estación vientos arriba se observa una distribución más amplia, con aportes desde el oeste y sectores cercanos al norte. Este comportamiento sugiere la posible influencia de fuentes emisoras ubicadas en dichos cuadrantes, así como el transporte de material particulado bajo condiciones meteorológicas favorables para su desplazamiento.

En el caso de $PM_{2.5}$, el patrón direccional es similar al observado para PM_{10} , aunque con rangos de concentración menores, como es esperable por tratarse de la fracción fina del material particulado. Las concentraciones más relevantes también se asocian a vientos provenientes del oeste y noroeste, lo que evidencia una posible relación entre ambas fracciones del material particulado y fuentes o procesos de transporte comunes. No obstante, la señal de $PM_{2.5}$ tiende a ser más homogénea y persistente, lo cual puede estar asociado a la mayor capacidad de transporte regional de las partículas finas.

Desde el punto de vista horario, los gráficos anulares permiten observar que las concentraciones no se restringen a una única hora del día, sino que se presentan en diferentes franjas horarias, con mayor recurrencia bajo las direcciones predominantes del viento. Esto indica que el comportamiento de las concentraciones está condicionado no solo por la hora del día, sino principalmente por la dirección del viento y las condiciones de transporte atmosférico. Los mayores niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se presentan, en general, bajo velocidades de viento bajas a moderadas, lo cual sugiere que las condiciones de menor circulación del viento pueden favorecer la acumulación o menor dilución de contaminantes. En contraste, cuando se presentan velocidades más altas, las concentraciones tienden a distribuirse de manera más dispersa, reflejando una mayor capacidad de dilución atmosférica.

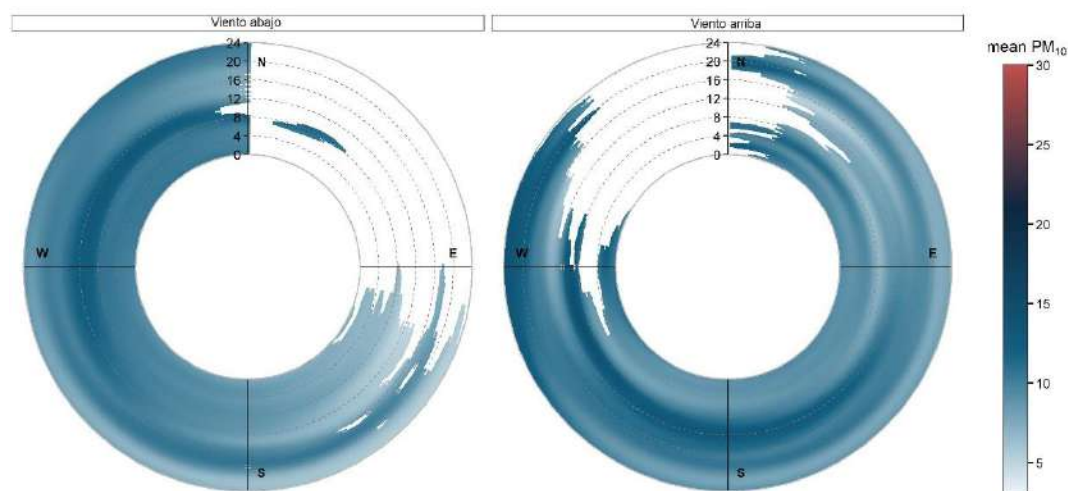


Figura 14. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025 – LAM4656

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

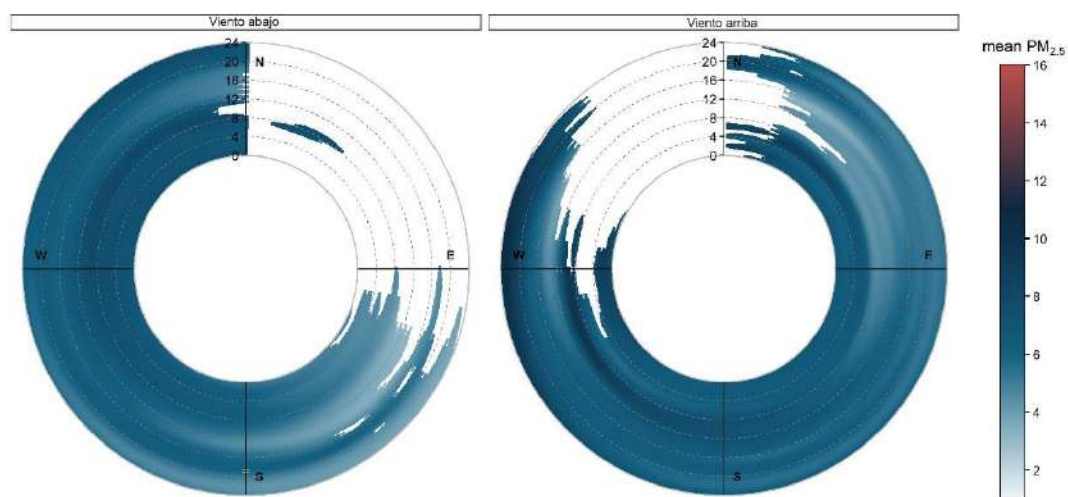


Figura 15. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025 – LAM4656

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

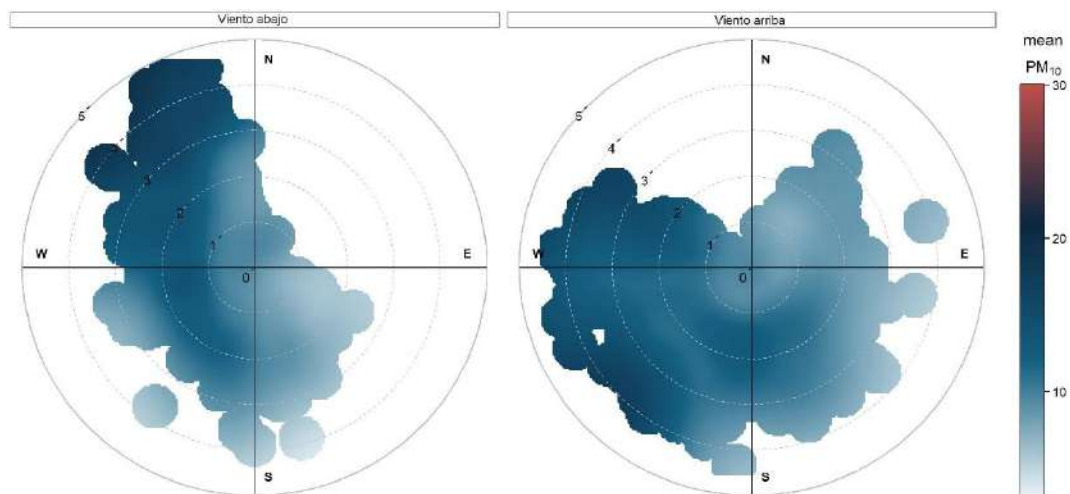


Figura 16. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025 – LAM4656

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

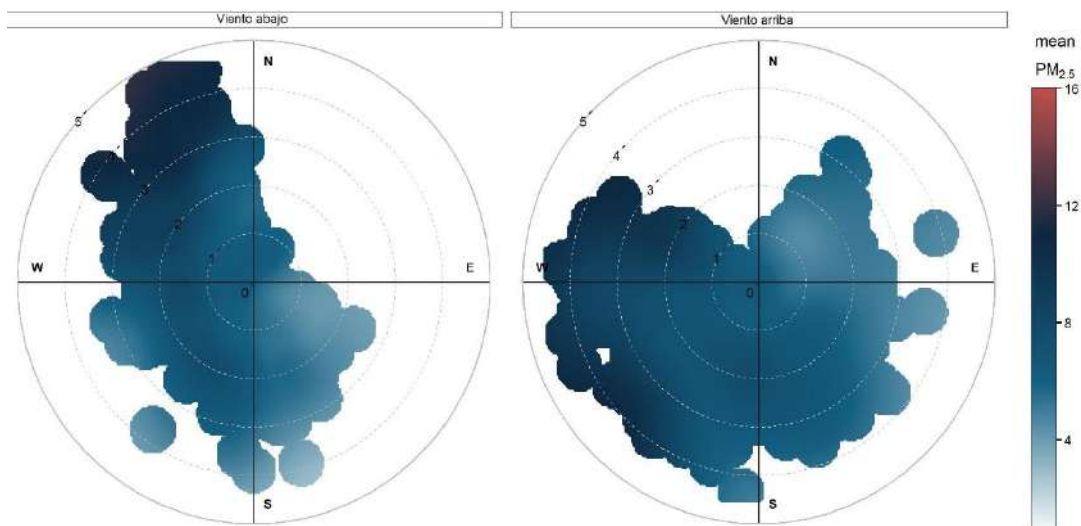


Figura 17. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025 – LAM4656

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

En conjunto, los resultados indican que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$ presentaron una relación clara con el régimen de vientos del área, especialmente con los flujos provenientes del occidente y noroccidente. La similitud entre los patrones de ambas fracciones sugiere la influencia de fuentes o procesos de transporte comunes. Con todo, mientras que el PM_{10} muestra una señal más intensa y localizada, el $PM_{2.5}$ presenta un comportamiento más homogéneo. Por tanto, la interpretación de las concentraciones debe considerar la interacción entre dirección del viento, velocidad y hora del día, como elementos determinantes en la dispersión y transporte del material particulado en el área del proyecto LAM4656.

En lo que concierne al proyecto LAV0002-00-2020 (Figura 18 a la Figura 21), los gráficos polares anulares y polares de concentración para PM_{10} y $PM_{2.5}$ muestran una marcada variabilidad espacial entre las estaciones evaluadas, evidenciando que el comportamiento del material particulado en el área del proyecto está influenciado por fuentes y condiciones de transporte diferenciadas. En términos generales, las mayores concentraciones se asocian a vientos provenientes de los cuadrantes occidental y suroccidental, particularmente en las estaciones QAC01-Puente Uré y QAC09-Puente Uré II, donde se identifican focos direccionales bien definidos tanto para PM_{10} como para $PM_{2.5}$.

Las estaciones QA03-Torno Roto y QAC01-Puente Uré presentaron los niveles más elevados y los patrones direccionales más marcados, observándose incrementos de concentración asociados a vientos provenientes del este en QA03 y del suroccidente en QAC01, lo que sugiere la influencia de fuentes localizadas o corredores preferenciales de transporte atmosférico. Por el contrario, en QA06-Sajana y QAC09-Puente Uré II las concentraciones muestran una distribución más homogénea y niveles generalmente inferiores, indicando una mayor dispersión o una menor influencia de fuentes cercanas.

La comparación entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ evidencia patrones espaciales similares, aunque la señal de $PM_{2.5}$ resulta más localizada en algunas estaciones, particularmente en QAC09-Puente Uré II, donde los mayores niveles se concentran en un rango más restringido de direcciones y velocidades de viento. Esta diferencia sugiere que la fracción fina podría estar asociada a fuentes específicas o procesos de transporte distintos a los que dominan el comportamiento del PM_{10} .

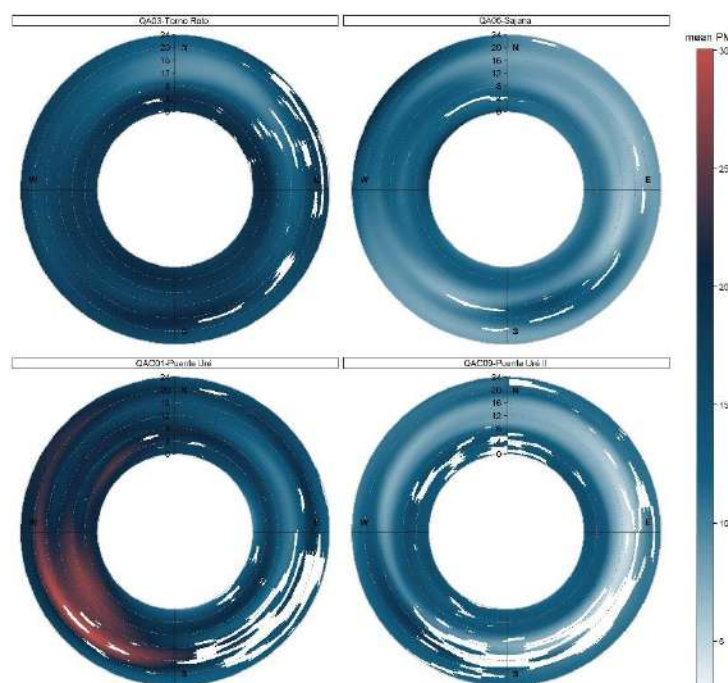


Figura 18. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

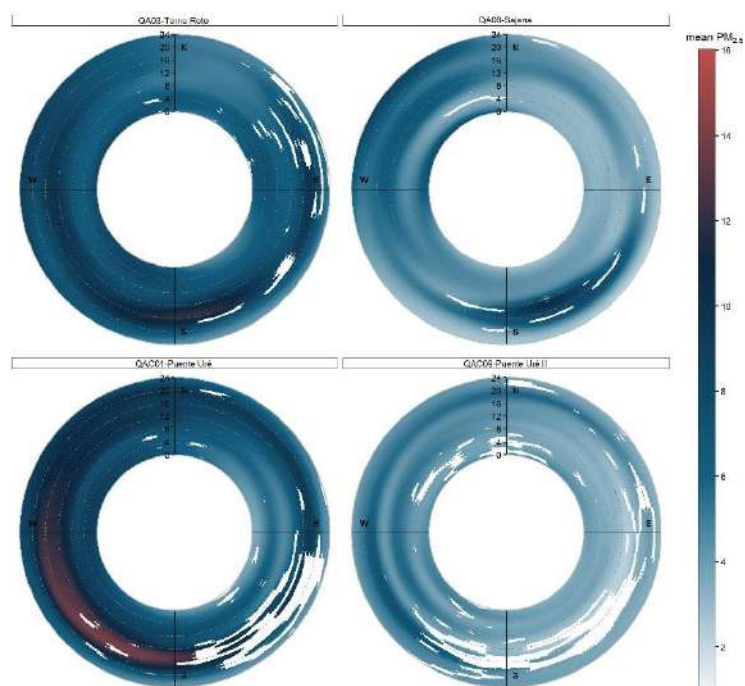


Figura 19. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

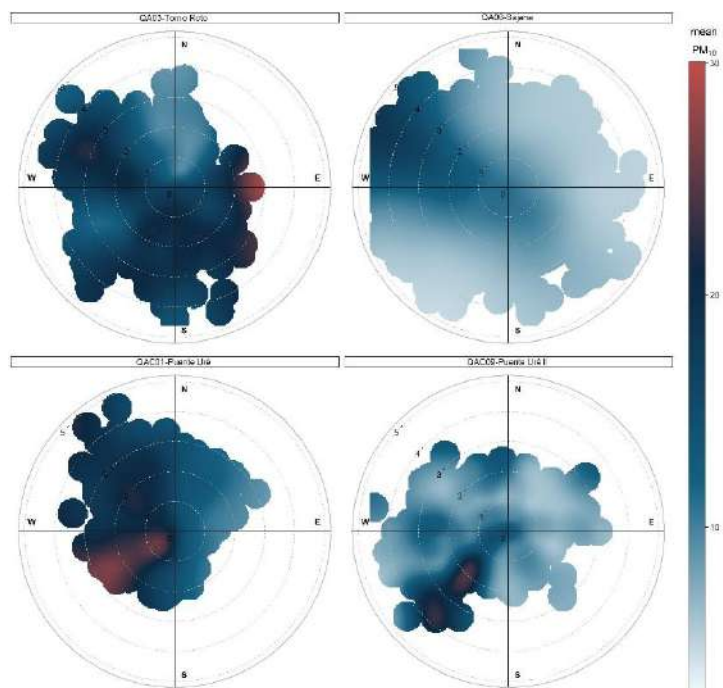


Figura 20. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

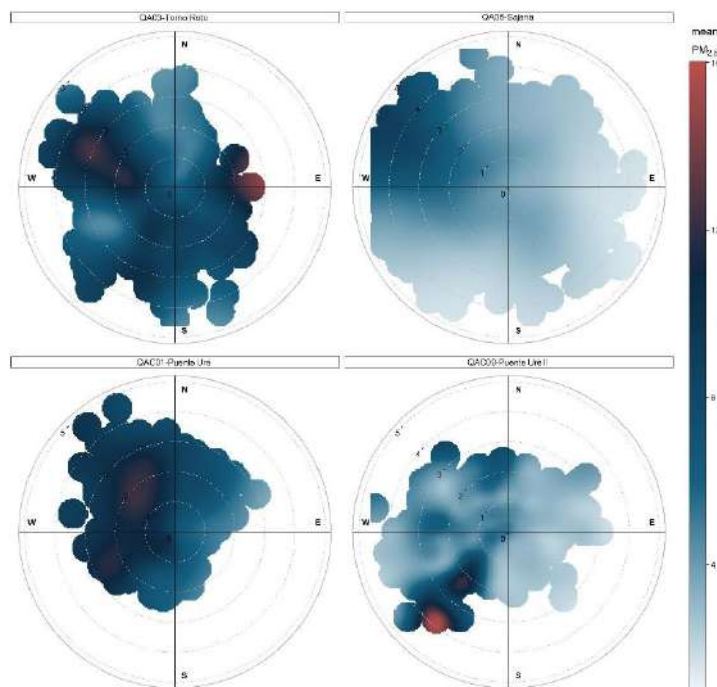


Figura 21. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2025 – LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

De manera integral, los resultados indican que las concentraciones de material particulado en el área del proyecto no responden a un único patrón regional, sino a una combinación de influencias locales y procesos de transporte atmosférico que varían entre estaciones. La coincidencia de las mayores concentraciones con direcciones específicas del viento permite identificar sectores potenciales de aporte y confirma la utilidad de este análisis para complementar la interpretación de los resultados de calidad del aire.

4.2.4 Análisis de ciclos temporales

Con el fin de evaluar el comportamiento temporal de las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el área de influencia de los proyectos del Alto San Jorge, se analizaron los ciclos de variación semanal, horaria y mensual registrados durante 2025 en las estaciones de monitoreo QA03-Torno Roto, QA04-Balsilla, QA06-Sajana, QAC01-Puerto Uré y QAC09-Puerto Uré II, así como en los receptores clasificados como viento arriba y viento abajo. El análisis permite identificar patrones espaciales y temporales asociados tanto a las condiciones meteorológicas predominantes como a las actividades desarrolladas en el área de estudio.

Los resultados se muestran en las siguientes situaciones: registros horarios separando mañana y tarde por estación (Vientos arriba y abajo), el comportamiento semanal con datos diarios y los promedios mensuales del periodo de análisis. En las siguientes figuras se



muestran las tendencias de las concentraciones, presentando el $PM_{2.5}$ en color azul y PM_{10} en gris.

- Variación horaria: El análisis horario muestra patrones diferenciados entre estaciones, aunque se identifican tendencias comunes. En general, las concentraciones de PM_{10} presentaron incrementos durante las primeras horas de la mañana, alcanzando máximos entre las 08:00 y las 12:00 horas. Posteriormente, se observó una disminución gradual durante la tarde, seguida de un segundo incremento en algunas estaciones durante las horas de la noche.

Las estaciones QA03-Torno Roto y QAC01-Puente Uré registraron los mayores niveles de PM_{10} , con concentraciones superiores a $20 \mu g/m^3$ durante los periodos de máxima actividad. Por su parte, $PM_{2.5}$ presenta una variación más moderada y estable a lo largo del día, con incrementos menos pronunciados que los observados para PM_{10} .

En los receptores viento arriba y viento abajo se identificaron máximos horarios similares durante la mañana, con concentraciones más elevadas entre las 09:00 y las 12:00 horas, seguidos de una disminución en horas de la tarde. La similitud de los patrones observados entre ambos receptores sugiere una influencia importante de las condiciones meteorológicas regionales sobre la dinámica del material particulado, además de las posibles contribuciones de fuentes locales. (Figura 22 a)

- Variación mensual: La variación mensual mostró una marcada estacionalidad en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$. En la mayoría de las estaciones se observó mayores valores durante el primer trimestre del año, particularmente entre febrero y marzo, cuando las concentraciones de PM_{10} alcanzaron sus máximos anuales. A partir de abril se presentó una disminución significativa de las concentraciones, manteniéndose niveles relativamente bajos entre mayo y octubre.

Hacia finales del año se evidenció un incremento gradual, especialmente durante noviembre y diciembre, coincidiendo con periodos de menor precipitación y condiciones favorables para la resuspensión de partículas. Este comportamiento es consistente tanto en las estaciones de monitoreo como en los receptores viento arriba y viento abajo.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ siguen la misma tendencia temporal que PM_{10} , aunque con menor amplitud de variación, lo que indica una respuesta similar a las condiciones meteorológicas regionales, particularmente a los cambios en precipitación, humedad y dispersión atmosférica. (Figura 22 b)

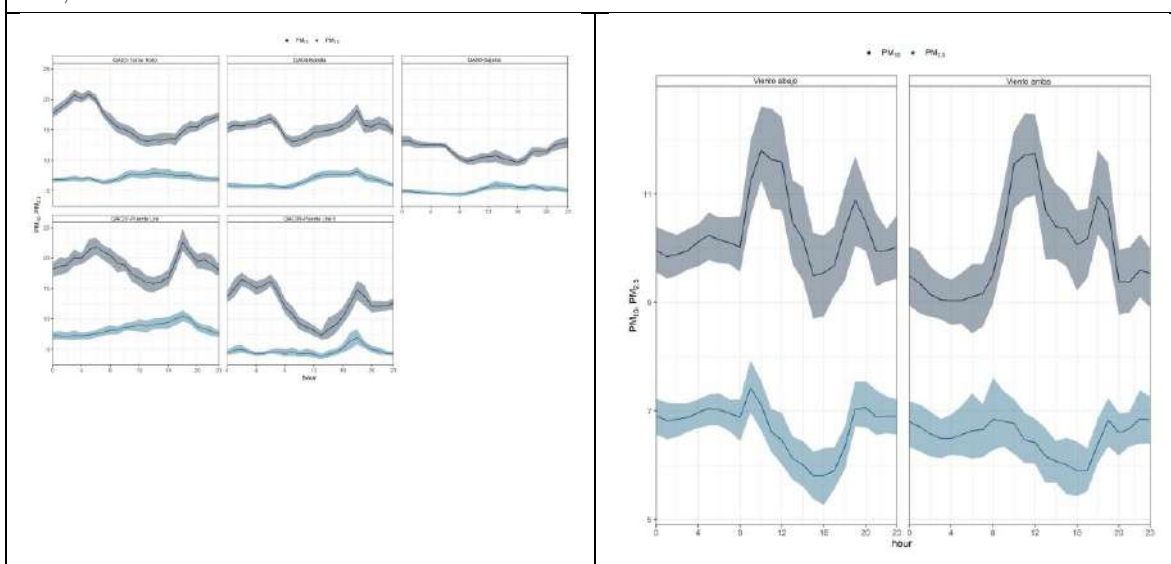
- Variación semanal: La variación semanal evidenció un comportamiento relativamente estable para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todas las estaciones analizadas. No obstante, se observaron incrementos moderados durante los miércoles y jueves, particularmente en las estaciones QAC01-Puente Uré y QAC09-Puente Uré II, donde las concentraciones de PM_{10} alcanzaron sus valores máximos semanales. Por el contrario, durante los fines de semana se presentó una ligera disminución de las concentraciones, especialmente los sábados y domingos.



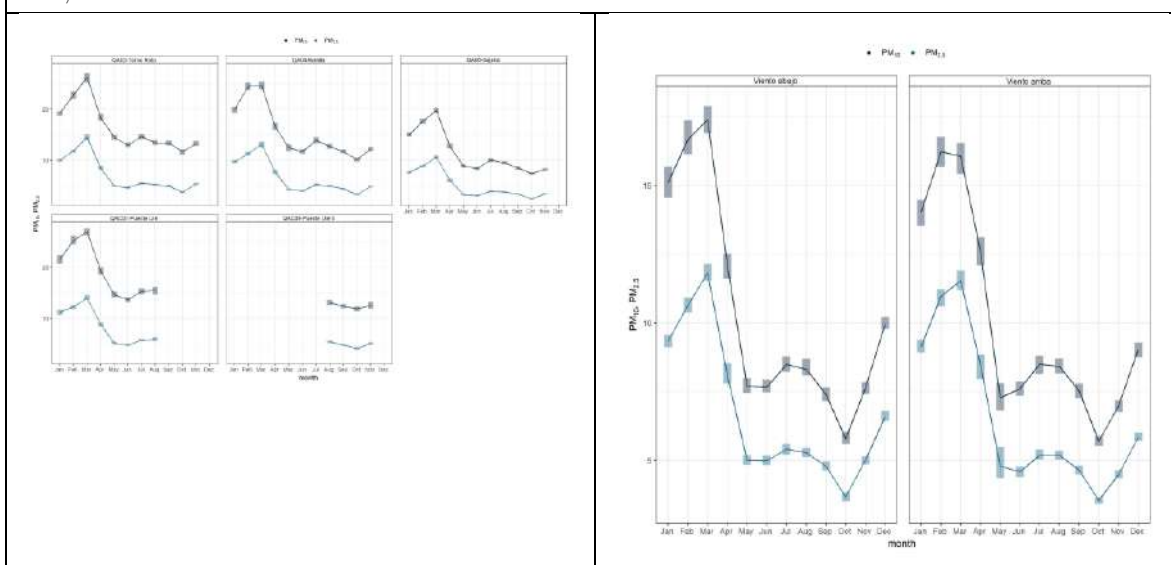
Los receptores viento arriba y viento abajo presentaron una tendencia similar, con máximos registrados hacia mitad de semana y reducciones durante el fin de semana. La baja amplitud de las variaciones semanales sugiere que las fuentes de emisión mantienen un comportamiento relativamente constante durante la semana, sin evidenciar episodios significativos asociados a días específicos de operación. (Figura 22 c)

A partir de lo anterior, es posible determinar que el material particulado PM_{10} predomina en el área de estudio, ya que las concentraciones son más altas. Adicionalmente, se puede determinar variabilidad durante las horas pico del día. Esta condición, se puede atribuir a la resuspensión del polvo del tráfico vehicular y a las actividades industriales cercanas a las estaciones de monitoreo. Por su parte, el material particulado fino ($PM_{2.5}$) al presentar una variación más homogénea puede asociarse a la quema de combustibles y/o de biomasa.

15 a) Variación horaria



15 b) Variación Mensual



15 c) Variación Semanal

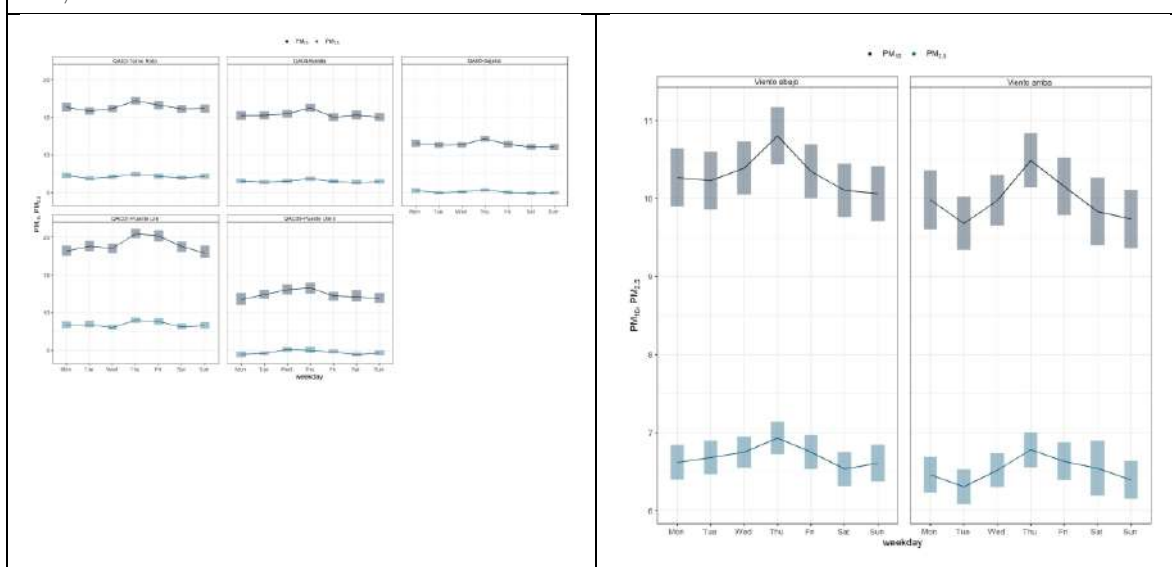


Figura 22. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire año 2025

Fuente: ANLA - SIPTA, a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

En cuanto a los ciclos temporales mensuales para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2023 y 2024, cuya información se detalla en el Anexo 6.2 del presente documento, se evidenciaron picos de concentración durante los meses de diciembre y enero, principalmente asociados a condiciones secas. En el comportamiento a sotavento se registraron concentraciones de PM_{10} superiores a $20 \mu g/m^3$ y de $PM_{2.5}$ superiores a $15 \mu g/m^3$, valores que aumentaron en 2024.

En relación con los ciclos semanales, durante 2023 las concentraciones mantuvieron un comportamiento relativamente constante en los días hábiles, con descensos durante los fines de semana. Finalmente, los ciclos diarios mostraron una mayor variabilidad en 2024.

4.2.5 Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA

Con base en lo reglamentado por el Capítulo IV de la Resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a continuación, se presenta el análisis de los índices de Calidad de Aire ICA diarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$. De igual forma en el Anexo 1, se detallan los resultados del índice de Calidad de Aire para todos los datos disponibles con su respectiva representación gráfica.

De acuerdo con la mencionada resolución, el Índice de Calidad del Aire se encuentra asociado con los siguientes efectos:

Tabla 5. Descripción general del Índice de Calidad del Aire - ICA

RANGO	COLOR	ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
0-50	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.

RANGO	COLOR	ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE	EFFECTOS
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

4.2.5.1 ICA - Material particulado PM_{10}

La Figura 23, presenta la distribución porcentual de las categorías ICA de PM_{10} en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la estrategia de monitoreo para el año 2025. Los resultados evidencian que el 100 % de los registros en todas las estaciones monitoreadas, pertenecientes a las estaciones de monitoreo que hacen parte de la presente estrategia, reflejaron un índice de calidad del aire en categoría "Buena", lo cual representa un riesgo para la salud pública mínimo o nulo.

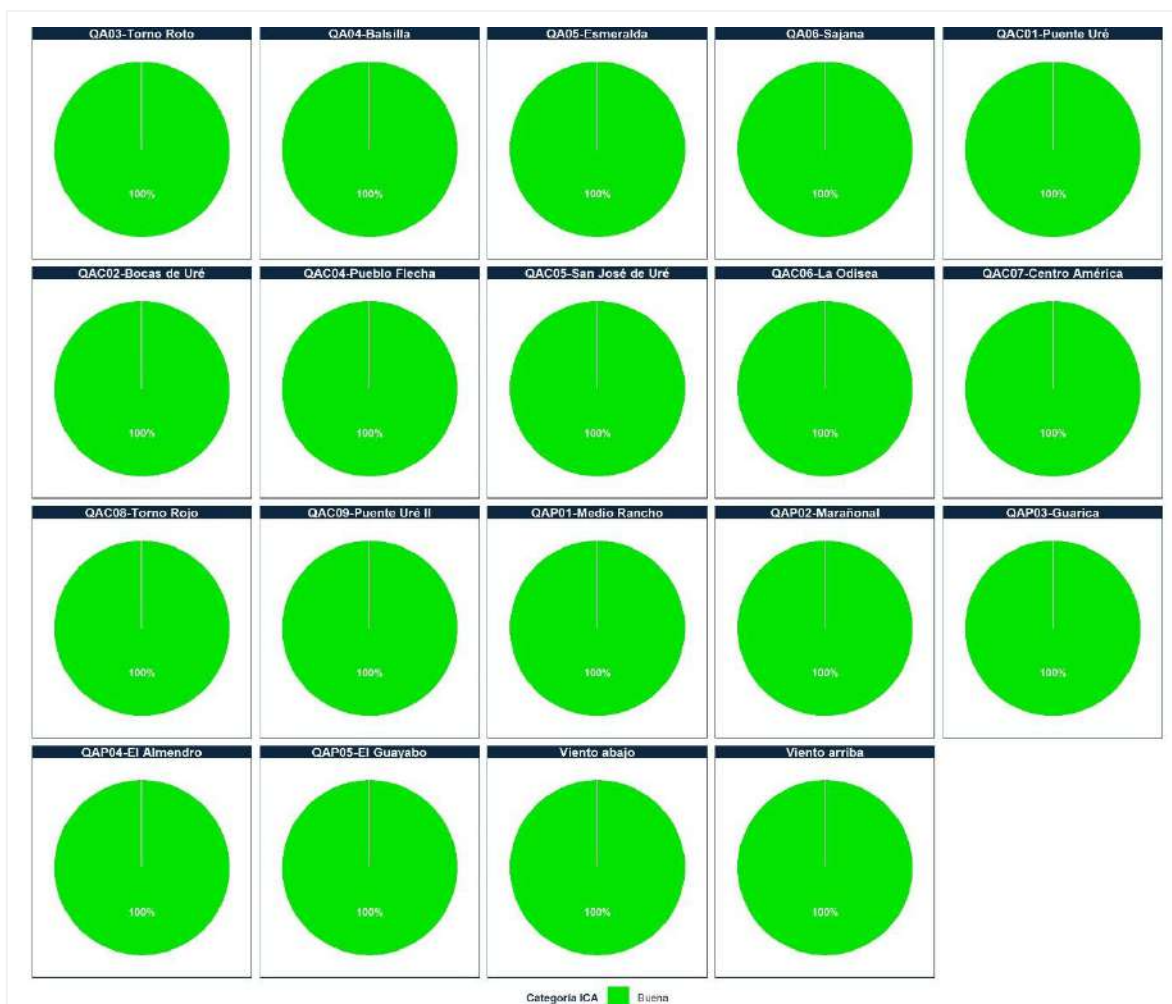


Figura 23. Índices de calidad del aire de 2025 ICA PM₁₀

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

4.2.5.2 ICA - Material particulado PM_{2.5}

La Figura 24, presenta la distribución porcentual de las categorías ICA de PM_{2.5} en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la presente estrategia.

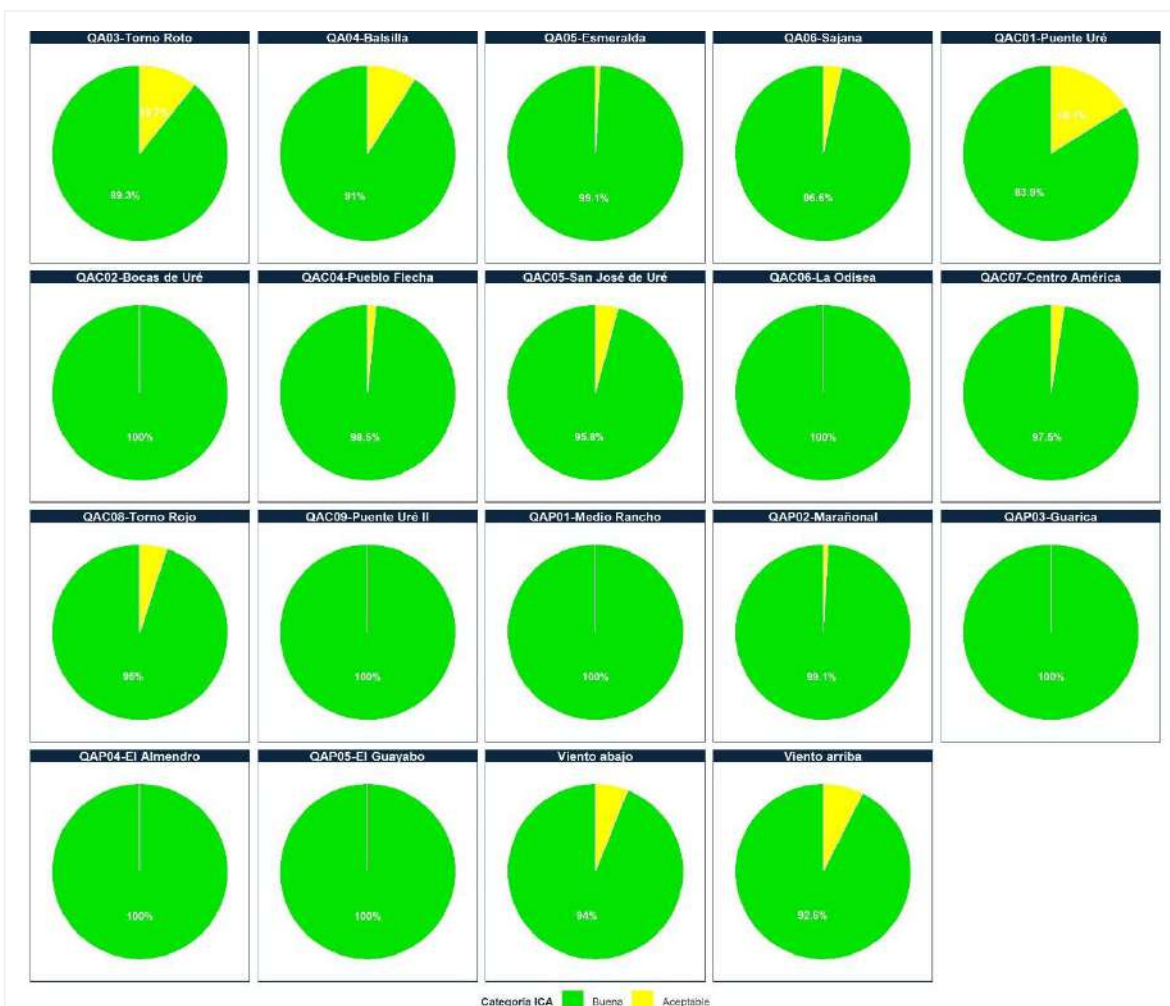


Figura 24. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

Conforme a la figura anterior, se puede identificar que la mayoría de las estaciones mantienen una predominancia de la categoría ICA "Buena", destacándose: QAC02-Bocas de Uré, QAC06-La Odisea, QAC09-Puente Uré II, QAP01-Medio Rancho, QAP03-Guarica, QAP04-El Almendro y QAP05-El Guayabo, todas con el 100% de los registros en esta categoría. Así mismo, las estaciones QA05-Esmeralda, QA06-Sajana, QAC04-Pueblo Flecha, QAC04-San José de Uré, QAP02-Marañonal mantienen la categoría "Buena" por encima del 95 % de sus registros. Las estaciones donde se determinó una mayor proporción del ICA en categoría "Aceptable", se encuentran: QAC01-Puente Uré con 16.1%, QA03-Torno Roto con 10.7%, QA04-Balsilla con 9.0%, Viento arriba con 7.4%, Viento abajo con 6% y QAC08-Torno Rojo con 5% de los registros. Lo anterior indica una exposición moderada a concentraciones de PM_{2.5}, que pueden representar, según lo estipulado por la Resolución 2254 de 2017, posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.

En resumen, para PM_{2.5}, que presentó una mayor variabilidad en el Índice de Calidad del Aire (ICA), los proyectos evaluados mostraron los siguientes intervalos porcentuales por categoría de ICA a lo largo de los años analizados.

Tabla 6. Relación de Categorías ICA PM_{2.5} para los años 2021 a 2025

EXPEDIENTE	CATEGORÍA ICA PM _{2.5}	% POR AÑO				
		2021	2022	2023	2024	2025
LAV0002-00-2020	Buena	57.9 - 100	83.5 - 95.9	61.5 - 100	53.6 - 92.7	83.9 - 100
	Aceptable	4.3 - 42.1	4.1 - 16.5	0.9 - 38.7	7.3 - 46.4	0 - 16.1
	Dañina a grupos sensibles	0	0.9	0	0	0
LAV0052-00-2019	Buena	-	87.0 - 91.2	61.8 - 77.6	83.2 - 95.5	99.1 - 100
	Aceptable	-	8.8 - 10.1	22.4 - 36.4	4.5 - 16.8	0 - 0.9
	Dañina a grupos sensibles	-	0	1.8	0	0
LAM4656	Buena	-	89.5 - 91.4	87.1 - 87.7	85.8 - 87.2	92.6 - 94.0
	Aceptable	-	8.6 - 10.5	12.3 - 12.9	12.2 - 14.8	6.0 - 7.4
	Dañina a grupos sensibles	-	0	0	0	0

Fuente: ANLA – SIPTA, 2026 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

La información presentada en la Tabla 6 permite evaluar el comportamiento del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} en los proyectos LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656 durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 2021 a 2025. En general, se observa que la categoría “Buena” predomina en todos los años y en todos los expedientes, con porcentajes que superan consistentemente el 50 %, e incluso alcanzan el 100 % en algunos periodos. Esto sugiere una condición general favorable en términos de calidad del aire para PM_{2.5} en las áreas de influencia de los proyectos evaluados.

En cuanto a las tendencias interanuales, el expediente LAV0002-00-2020 es el que presenta mayor variabilidad: el límite inferior de la categoría “Buena” osciló entre 53.6 % (2024) y 100 % (en algunos periodos de 2021 y 2023), con una categoría “Aceptable” que llegó a representar hasta el 46.4 % en 2024. Para 2025, este expediente mostró una mejora notable, con rangos de “Buena” entre 83.9 % y 100 % y una categoría “Aceptable” que no supera el 16.1 %, siendo el valor más bajo registrado en el periodo.

El expediente LAV0052-00-2019 evidencia la mejora más significativa del periodo: tras registrar en 2023 una categoría “Dañina a grupos sensibles” del 1.8 % y proporciones de “Buena” entre 61.8 % y 77.6 %, en 2025 alcanza valores de “Buena” entre 99.1 % y 100 %, con una presencia marginal de “Aceptable” de apenas el 0.9 %, lo que representa la mejor condición registrada para este proyecto en toda la serie analizada.

Por su parte, el proyecto LAM4656 (central térmica) mantiene el comportamiento más estable del conjunto, con una tendencia positiva sostenida: la categoría “Buena” pasó de rangos del 89.5–91.4 % en 2022 al 92.6–94.0 % en 2025, mientras que la categoría “Aceptable” se redujo de manera progresiva hasta situarse entre el 6.0 % y 7.4 % en el último año. La

ausencia de categorías dañinas refuerza el carácter limitado del impacto sobre los niveles de PM2.5 en el área de influencia.

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

En relación con las actuaciones judiciales, se efectuó la revisión de los expedientes objeto de análisis dentro del área de la Estrategia Atmosférica del Alto San Jorge, con el fin de identificar decisiones judiciales vigentes que guardaran relación con los componentes de calidad del aire y ruido ambiental.

Como resultado de esta revisión, no se identificaron órdenes judiciales, sentencias o medidas cautelares vigentes que impongan obligaciones específicas asociadas al monitoreo, seguimiento, control o gestión de la calidad del aire o del ruido ambiental en el área de estudio. En consecuencia, no se evidencian condicionamientos judiciales que deban ser considerados de manera particular dentro de la evaluación de los resultados de monitoreo analizados en el presente documento.

Respecto a los procesos sancionatorios vigentes relacionados con el componente atmosférico, se identificó el proceso sancionatorio SAN0100-00-2021, actualmente activo, asociado al expediente LAM4656 de la Generadora y Comercializadora de Energía del Caribe S.A. E.S.P. – GECELCA S.A. E.S.P. Los hechos objeto de investigación se relacionan con el presunto incumplimiento de medidas de manejo orientadas al control de emisiones fugitivas de material particulado derivadas del almacenamiento y manejo de carbón, tales como la limpieza y lavado de camiones y la instalación de una barrera perimetral en el patio de carbón. Estas medidas tienen como finalidad reducir la dispersión de partículas hacia las áreas circundantes, por lo que el proceso constituye un antecedente relevante para la gestión del componente de calidad del aire en el área de estudio.

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

El Centro de Monitoreo de los Recursos Naturales de la ANLA desarrolló un modelo regional de dispersión de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) con el propósito de evaluar el estado de la calidad del aire en las zonas del río San Jorge y los afluentes del río Sinú. Para ello, se integraron datos meteorológicos y de emisiones atmosféricas correspondientes al Informe de Cumplimiento Ambiental del año 2024. Este análisis se enfoca en los proyectos licenciados activos del sector minero y termoeléctrico, los cuales se describen en la **tabla 7**.

Tabla 7. Proyectos incluidos en modelación de Alto San Jorge

ACTIVIDAD	PROYECTO/FUENTE	EXPEDIENTE
Energía	Construcción y Operación de una Central Térmica de Generación de Energía Eléctrica a Carbón	LAM4656
Minería	Explotación y Transformación de Ferroníquel Cerro Matoso S.A.	LAV0002-00-2020
Minería	Aprovechamiento de recursos minerales en los Cerros Queresas y Porvenir	LAV0052-00-2019

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

El objetivo de la modelación atmosférica es evaluar el impacto acumulativo sobre el componente atmosférico en el área de implementación de la estrategia de monitoreo del Alto San Jorge. Para lograrlo, los modelos de dispersión integran las principales fuentes de emisión asociadas a los POA del año 2024 que cuentan con información disponible, destacando específicamente las actividades vinculadas a los expedientes LAV0002-00-2020, LAV00052-00-2019 y LAM4656.

4.3.1 Parametrización

En el desarrollo de la modelación, se presentaron las siguientes restricciones y/o limitaciones, en el sentido de no incluir otras fuentes de emisión de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) de la zona, que no son competencia del control y seguimiento de la ANLA, tales como:

- Fuentes móviles (parque automotor): Emisiones por el tubo de escape de los vehículos particulares, transporte público, de carga y motocicletas que transitan por la región.
- Tráfico sobre la red vial: Resuspensión de material particulado provocada por el tránsito vehicular en vías públicas pavimentadas y no pavimentadas (en afirmado).
- Fuentes fijas de menor escala: Industrias locales, ladrilleras o actividades productivas cuya regulación y seguimiento recae sobre las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) o autoridades locales.
- Quemadas de biomasa y residuos: Incendios forestales, quemadas agrícolas para la preparación de tierras, uso de leña a nivel residencial e incineración no controlada de basuras.

- Emisiones naturales y eólicas: Levantamiento de polvo por la acción del viento sobre zonas erosionadas o sin cobertura vegetal.
- Fuentes externas: Ingreso de contaminación atmosférica transportada por los vientos desde zonas ajenas al área de estudio (transporte de largo alcance).

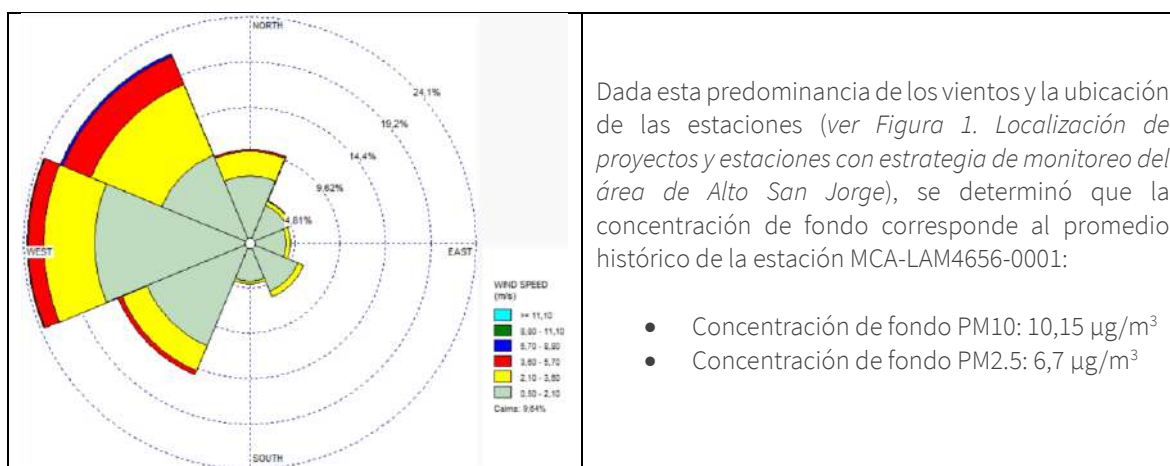
Para el desarrollo del modelo de dispersión de contaminantes en la zona del Alto San Jorge se empleó, el modelo Aermod recomendado por la EPA, en le cual se contempló información meteorológica WRF del expediente LAM4656 y se empleó la información de terreno para ambos sectores del modelo de elevación (SRTM30) a resolución de 30 metros.

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

- Información primaria:
 - Modelación reportada en los Informes de Cumplimiento Ambiental
 - Soportes de modelación del expediente LAV0002 - Mina Cerromatoso.
 - Soportes de modelación del expediente LAV0052-00-2019 - Mina Queresas y Porvenir.
 - Estudios isocinéticos: Fuentes fijas termoeléctrica LAM4656 - Gecelca.
- Escenario de modelación:
 - Escenario Actual: Relacionado con las actividades desarrolladas en 2024 por los proyectos asociados a la estrategia de monitoreo.
- Receptores sensibles:
 - Se utilizó la herramienta *Microsoft Building Footprints* para identificar edificaciones en el área de interés, tomando como referencia un buffer de 20 km alrededor de las zonas de los proyectos considerados. Esto permitió detectar posibles receptores sensibles, como viviendas u otras construcciones expuestas. No obstante, con el fin de reducir la densidad de puntos para el análisis, se aplicó un algoritmo de *clustering* espacial mediante DBSCAN, con un radio de agrupamiento de 100 metros. De cada grupo generado se seleccionó un único punto representativo, lo que resultó en una muestra optimizada de 1.803 receptores, sin comprometer la distribución espacial ni la representatividad del conjunto original.
 - Se contemplaron como receptores discretos las veinte (20) estaciones de monitoreo del sistema de vigilancia permanente instaladas por las Sociedades que hacen parte de la Estrategia de Monitoreo Regional.
- Concentración de Fondo: La definición de la concentración de fondo constituye el punto de partida para cuantificar el aporte real de los proyectos sobre la calidad del aire regional. De acuerdo con la rosa de vientos, se evidenció una predominancia absoluta de los vientos incidentes desde el noroeste (NW) y oeste (W), por lo cual la pluma de dispersión se desplazó de manera consistente hacia el sureste. Las estaciones de monitoreo empleadas para establecer esta línea base se situaron

considerando dicha predominancia eólica. Es imperativo señalar que la clasificación de las estaciones, particularmente aquellas designadas como "vientos abajo", se fundamentó en las dinámicas meteorológicas reales y su relación geométrica con las áreas operativas de los proyectos, y no en una simple disposición geográfica, asegurando la máxima representatividad técnica en la medición del aire no impactado por las fuentes evaluadas.

Tabla 8. Comportamiento vientos definición concentración de fondo.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

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 PM₁₀ y PM_{2.5}, en la Tabla 9 se presentan las estadísticas descriptivas correspondientes a los puntos denominados como receptores sensibles, los cuales fueron seleccionados conforme a la metodología definida en el numeral 3.3.1.

Tabla 9. Estadísticos Concentraciones anuales sobre receptores discretos – Escenario Actual

Contaminante	Unidad	Escenario	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Actual	12,87	8,61	37,94	0,58	12,23
PM2.5	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Actual	1,55	1,06	4,49	0,08	1,42

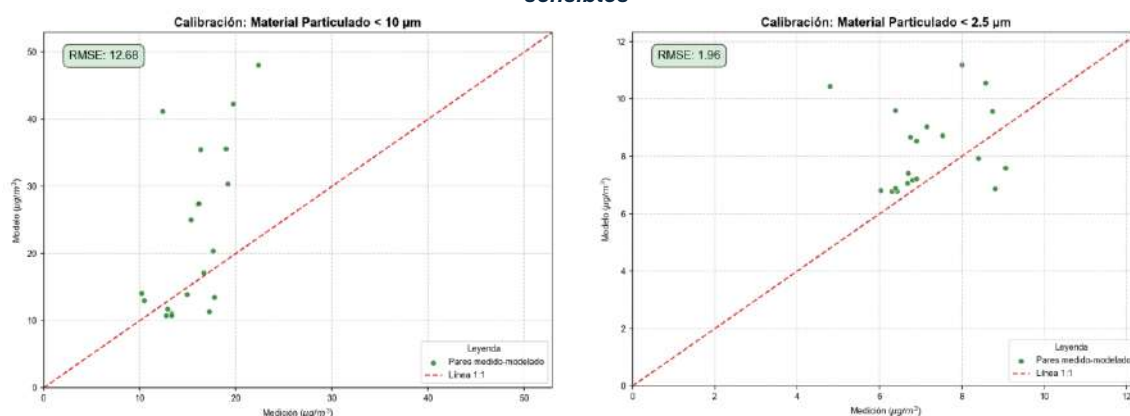
Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

Producto de la modelación para el escenario actual, los resultados muestran que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los receptores sensibles presentaron promedios espaciales de $12,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. A diferencia de un comportamiento homogéneo, los datos sugieren una alta dispersión espacial. Esto se evidencia claramente en las elevadas desviaciones estándar en proporción a sus medias ($12,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $1,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) y en el hecho de que las medianas ($8,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se encuentran notablemente por debajo de los promedios. Esta asimetría positiva en los datos indica que, si bien la mayor parte del territorio de estudio mantiene una carga base relativamente baja, existen áreas puntuales con picos de concentración que elevan la media global.

Sin embargo, el contraste entre los valores mínimos ($0,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) y los valores máximos registrados ($37,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $4,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 25. Comparación entre concentraciones modeladas y medidas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en receptores sensibles



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

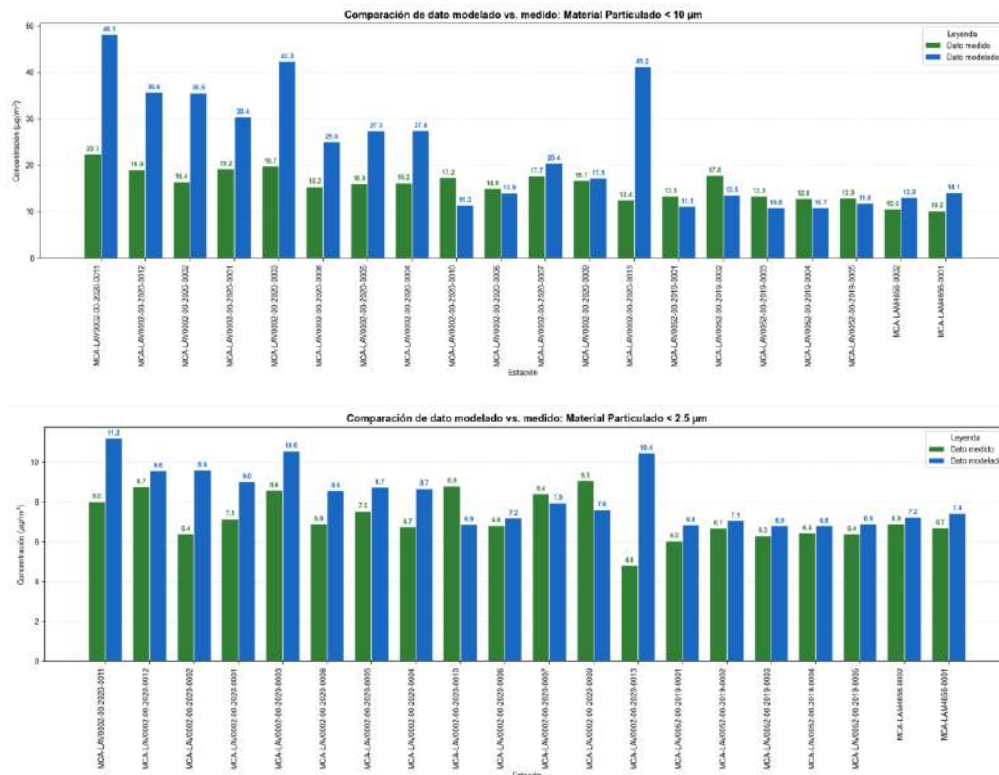
Respecto a la gráfica de correlación para el Material Particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}), los resultados evidencian un Error Cuadrático Medio (RMSE) de $12,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al analizar la distribución espacial de los pares medido-modelado frente a la línea de concordancia 1:1, se identificó una tendencia del modelo a sobreestimar las concentraciones reales, debido a que una proporción significativa de los puntos se ubica por encima de dicha línea de referencia (particularmente frente a mediciones entre 15 y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En el contexto del licenciamiento ambiental, esta desviación positiva configura un escenario predictivo de carácter conservador, lo cual asegura que no se debe subestimar los impactos potenciales sobre la calidad del aire; sin embargo, la dispersión observada hace

necesario que las conclusiones derivadas de este parámetro se interpreten reconociendo un margen de incertidumbre propio de las variables de entrada del modelo.

Por su parte, el análisis de correlación para el Material Particulado menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) refleja un desempeño del modelo sustancialmente más ajustado, respaldado por un RMSE bajo, de apenas $1,96 \mu g/m^3$. La gráfica ilustra que los pares de datos presentan una dispersión acotada y se adhieren con mayor fidelidad a la línea de referencia 1:1, especialmente en el rango de concentración de 6 a $9 \mu g/m^3$. Aunque persiste un leve sesgo conservador (ligera sobreestimación), la alta correspondencia entre los valores simulados y los registrados en campo, demuestra que el modelo logra capturar de manera robusta y altamente confiable la dinámica de dispersión de la fracción fina del material particulado. Esto otorga una elevada certidumbre técnica a la modelación de $PM_{2.5}$, elemento clave para la toma de decisiones y la evaluación por parte de la autoridad ambiental.

Como parte integral del proceso de validación del modelo de dispersión se presenta el análisis comparativo detallado entre las concentraciones medidas en campo y las concentraciones simuladas para cada estación de monitoreo. Esta evaluación espacial permite verificar la precisión y el desempeño predictivo del modelo frente a la realidad territorial para el Material Particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), tal como se detalla:

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026



Al revisar los resultados de Material Particulado (PM_{10}), se observan diferencias significativas entre las concentraciones estimadas por el modelo y los registros reales de las estaciones de monitoreo. En puntos específicos, el modelo proyecta valores superiores a las mediciones reales, tal como se evidencia en la estación MCA-LAV0002-00-2020-0011, con un valor modelado de $37,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a $22,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ medidos. En contraste, otras ubicaciones presentan estimaciones sustancialmente más bajas, como es el caso de las estaciones MCA-LAV0052-00-2019-0001 y MCA-LAV0052-00-2019-0004. Está marcada variación obedece a que el modelo fue configurado para integrar exclusivamente las emisiones provenientes de los proyectos licenciados en el área de estudio. En consecuencia, la simulación refleja incrementos notables en aquellas áreas bajo la influencia directa de dichas operaciones, mientras que arroja valores reducidos en estaciones donde la calidad del aire está determinada principalmente por fuentes externas o dinámicas locales que no hacen parte del alcance de las licencias evaluadas.

Respecto al Material Particulado fino ($PM_{2.5}$), se identifica una tendencia más uniforme, caracterizada por resultados modelados consistentemente inferiores a los valores medidos en campo. A modo de ejemplo, en la estación MCA-LAV0052-00-2019-0004 el modelo calcula una concentración marginal ($0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que el equipo de monitoreo reporta $6,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al igual que en el caso del PM_{10} , esta diferencia sistemática responde al alcance de la modelación, la cual únicamente contabiliza el aporte de los proyectos licenciados. El $PM_{2.5}$ es un contaminante de amplia distribución ambiental, fuertemente influenciado por fuentes regionales como el flujo vehicular de terceros o actividades antrópicas poblacionales que no se encuentran incluidas en la presente modelación. Bajo esta premisa técnica, los resultados obtenidos resultan pertinentes para aislar y cuantificar de manera exacta la contribución específica de los proyectos evaluados.

Aunado a lo anterior, y con el fin de evaluar la posible acumulación de impactos en términos de calidad del aire, específicamente por material particulado, se seleccionaron los 20 receptores sensibles con mayor nivel de aporte. La información correspondiente a estos receptores se presenta en la Figura 26.

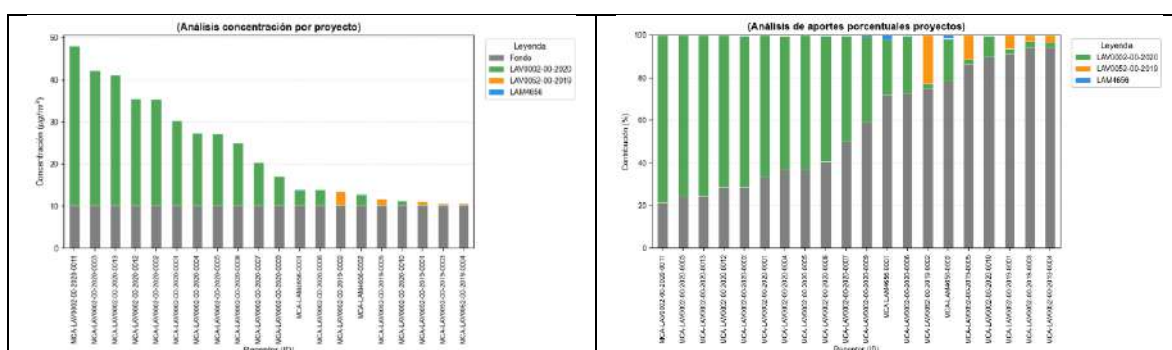


Figura 26. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM_{10} : Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025

Esta figura muestra que la contribución conjunta de los tres expedientes a los niveles de PM_{10} en los receptores sensibles, considerando la concentración de fondo, **no evidencia impactos**

acumulativos significativos en los puntos analizados. Esto se debe a que, en todos los casos, se observa una predominancia clara de un solo proyecto, con aportes cercanos al 80 % del total modelado. En particular, se destacan catorce (14) puntos asociados al expediente LAV0002-00-2020 y cinco (5) al expediente LAV0052-00-2019.

El análisis de aportes por proyecto evidenció impactos acumulativos significativos, registrando el nivel máximo en el receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011 con una concentración total aproximada de $48,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este sector, el proyecto LAV0002-00-2020 ejerce un dominio absoluto sobre la calidad del aire al aportar cerca de $38,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (representando el 80% del total modelado), superando ampliamente la concentración de fondo. A nivel espacial, este proyecto actúa como el principal aportante antrópico de la red, con contribuciones que fluctúan entre $3,0$ y $38,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, elevando de forma generalizada y crítica los niveles de inmisión en su área de influencia.

En contraste, los proyectos LAV0052-00-2019 y LAM4656 exhibieron dinámicas de impacto menores y altamente localizadas. El proyecto LAV0052-00-2019 generó un incremento máximo de $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (25% del impacto en el receptor MCA-LAV0052-00-2019-0002), mientras que LAM4656 aportó niveles marginales inferiores a $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En los sectores de la red asociados a estos dos proyectos, la concentración de fondo establecida de manera constante en $10,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para toda la cuenca rige la calidad del aire, constituyendo entre el 85% y el 95% del total proyectado.

En síntesis, la dinámica de la cuenca atmosférica modelada muestra que la concentración de fondo es la principal responsable de establecer 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 del proyecto LAV0002-00-2020.

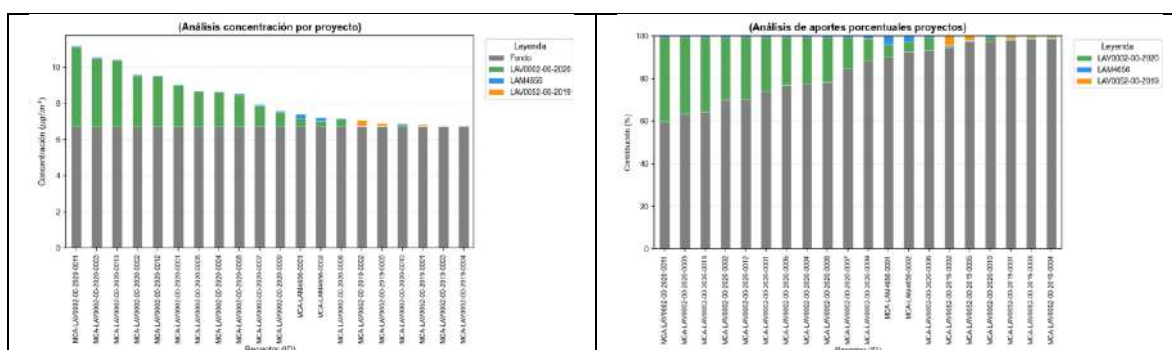


Figura 27. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de $\text{PM}_{2.5}$: Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

La Figura 27 presenta los 20 receptores sensibles con mayor aporte de $PM_{2.5}$, evidenciando que, al igual que en el caso de PM_{10} , **no se identifican impactos acumulativos significativos**. En la mayoría de los casos, se observa una clara predominancia de un solo expediente, con contribuciones hasta el 40% del aporte total por receptor.

La evaluación espacial indicó que la concentración máxima total se presentó en el receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011, con un valor cercano a $11,2 \mu g/m^3$. En este punto, el proyecto LAV0002-00-2020 actúa como el mayor aportante antrópico, sumando aproximadamente $4,5 \mu g/m^3$ (cerca del 40% de la inmisión total modelada). Aunque el impacto en la red está fuertemente gobernado por la carga base, las emisiones de este proyecto generan incrementos localizados significativos que oscilan entre $0,5$ y $4,5 \mu g/m^3$.

Por el contrario, la contribución de los proyectos LAM4656 y LAV0052-00-2019 resulta marginal y se encuentra altamente circunscrita a sus receptores inmediatos, registrando incrementos máximos de apenas $0,7 \mu g/m^3$ y $0,4 \mu g/m^3$, respectivamente. En las áreas de influencia de estas fuentes, la concentración de fondo, que se mantiene constante en $6,7 \mu g/m^3$ en toda la región, constituye el componente predominante de la concentración total proyectada, al representar más del 90 % de los niveles estimados.

En conclusión, si bien la concentración de fondo establece un límite base elevado y generalizado en el territorio, los picos de concentración máxima y la definición de las áreas de mayor criticidad ambiental para el $PM_{2.5}$ son atribuibles exclusivamente a las emisiones focalizadas e intensas del proyecto LAV0002-00-2020.

En línea con lo anterior, se presenta un 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 10. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM₁₀

ID	Fondo		LAM4656		LAV0002-00-2020		LAV0052-00-2019		concentración Final
	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³
MCA-LAV0002-00-2020-0011	10,15	21,1%	0,07	0,1%	37,87	78,7%	0,00	0,0%	48,09
MCA-LAV0002-00-2020-0003	10,15	24,0%	0,06	0,2%	32,05	75,8%	0,00	0,0%	42,26
MCA-LAV0002-00-2020-0013	10,15	24,6%	0,06	0,2%	30,97	75,2%	0,00	0,0%	41,19
MCA-LAV0002-00-2020-0012	10,15	28,5%	0,05	0,2%	25,40	71,3%	0,00	0,0%	35,60
MCA-LAV0002-00-2020-0002	10,15	28,6%	0,08	0,2%	25,24	71,1%	0,00	0,0%	35,47
MCA-LAV0002-00-2020-0001	10,15	33,4%	0,05	0,2%	20,17	66,4%	0,00	0,0%	30,37
MCA-LAV0002-00-2020-0004	10,15	37,0%	0,05	0,2%	17,19	62,7%	0,00	0,0%	27,40
MCA-LAV0002-00-2020-0005	10,15	37,1%	0,05	0,2%	17,13	62,7%	0,00	0,0%	27,33
MCA-LAV0002-00-2020-0008	10,15	40,6%	0,07	0,3%	14,80	59,1%	0,00	0,0%	25,02
MCA-LAV0002-00-2020-0007	10,15	49,8%	0,08	0,4%	10,16	49,8%	0,00	0,0%	20,39
MCA-LAV0002-00-2020-0009	10,15	59,3%	0,10	0,6%	6,87	40,1%	0,00	0,0%	17,12
MCA-LAM4656-0001	10,15	72,2%	0,28	2,0%	3,62	25,7%	0,01	0,0%	14,06
MCA-LAV0002-00-2020-0006	10,15	72,8%	0,05	0,4%	3,74	26,8%	0,00	0,0%	13,94
MCA-LAV0052-00-2019-0002	10,15	75,0%	0,02	0,1%	0,28	2,1%	3,08	22,8%	13,53
MCA-LAM4656-0002	10,15	78,2%	0,21	1,6%	2,62	20,2%	0,01	0,0%	12,98
MCA-LAV0052-00-2019-0005	10,15	86,2%	0,02	0,2%	0,26	2,2%	1,34	11,4%	11,77
MCA-LAV0002-00-2020-0010	10,15	89,8%	0,03	0,3%	1,12	9,9%	0,00	0,0%	11,31
MCA-LAV0052-00-2019-0001	10,15	91,2%	0,02	0,2%	0,26	2,3%	0,70	6,3%	11,13
MCA-LAV0052-00-2019-0003	10,15	94,3%	0,02	0,2%	0,29	2,7%	0,30	2,8%	10,76
MCA-LAV0052-00-2019-0004	10,15	94,6%	0,02	0,2%	0,24	2,2%	0,33	3,0%	10,73

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

El análisis detallado de la tabla de aportes a la concentración total revela que la calidad del aire en los receptores evaluados está fuertemente determinada por las emisiones del proyecto LAV0002-00-2020. A diferencia de otros escenarios, la concentración de fondo (con un valor constante de 10,15 µg/m³) no domina de manera absoluta en toda el área de estudio; su peso relativo varía drásticamente, representando apenas un 21,1 % en los puntos de mayor impacto, y alcanzando hasta un 94,6 % únicamente en los receptores con menor influencia directa de las fuentes (como MCA-LAV0052-00-2019-0004).

Al evaluar las fuentes de manera individual, el proyecto LAV0002-00-2020 destacó categóricamente como el mayor contribuyente regional. En el receptor más crítico (MCA-LAV0002-00-2020-0011), este proyecto aporta 37,87 µg/m³, lo que equivale al 78,7 % de la concentración final, impulsando el valor total a 48,09 µg/m³, el máximo registrado en la red. Esta tendencia de alto impacto es sistemática en los receptores asociados a este proyecto, donde sus aportes superan consistentemente el 60 % de la concentración modelada, evidenciando una fuerte influencia de esta instalación sobre su área de influencia inmediata.

En marcado contraste, los proyectos LAM4656 y LAV0052-00-2019 exhibieron impactos marginales y altamente localizados. Las contribuciones del proyecto LAM4656 fueron insignificantes en toda la red, alcanzando un máximo de apenas el 2,0 % (0,28 µg/m³) en el receptor MCA-LAM4656-0001. Por su parte, el proyecto LAV0052-00-2019 presentó un aporte focalizado del 22,8 % (3,08 µg/m³) en el receptor MCA-LAV0052-00-2019-0002, diluyéndose rápidamente a valores inferiores al 3 % en el resto de los puntos. Todo lo anterior demuestra que los niveles máximos de inmisión en esta zona están subordinados casi en su totalidad a las emisiones directas del proyecto LAV0002-00-2020.

Tabla 11. Análisis aportes discriminado por expediente y estación de monitoreo PM_{2.5}

ID	Fondo		LAM4656		LAV0002-00-2020		LAV0052-00-2019		concentración Final
	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³	%	µg/m³
MCA-LAV0002-00-2020-0011	6,70	59,9%	0,07	0,6%	4,42	39,5%	0,000	0,0%	11,19
MCA-LAV0002-00-2020-0003	6,70	63,4%	0,06	0,6%	3,80	36,0%	0,000	0,0%	10,57
MCA-LAV0002-00-2020-0013	6,70	64,2%	0,06	0,6%	3,68	35,2%	0,000	0,0%	10,44
MCA-LAV0002-00-2020-0002	6,70	69,7%	0,08	0,8%	2,83	29,4%	0,000	0,0%	9,61
MCA-LAV0002-00-2020-0012	6,70	70,1%	0,05	0,6%	2,81	29,4%	0,000	0,0%	9,56
MCA-LAV0002-00-2020-0001	6,70	74,2%	0,05	0,5%	2,28	25,3%	0,000	0,0%	9,03
MCA-LAV0002-00-2020-0005	6,70	76,8%	0,05	0,5%	1,98	22,6%	0,000	0,0%	8,72
MCA-LAV0002-00-2020-0004	6,70	77,3%	0,05	0,6%	1,91	22,1%	0,000	0,0%	8,67
MCA-LAV0002-00-2020-0008	6,70	78,4%	0,07	0,8%	1,78	20,8%	0,000	0,0%	8,54
MCA-LAV0002-00-2020-0007	6,70	84,4%	0,08	1,0%	1,16	14,6%	0,000	0,0%	7,93
MCA-LAV0002-00-2020-0009	6,70	88,2%	0,10	1,3%	0,80	10,5%	0,000	0,0%	7,60
MCA-LAM4656-0001	6,70	90,3%	0,28	3,8%	0,43	5,8%	0,001	0,0%	7,42
MCA-LAM4656-0002	6,70	92,8%	0,21	2,9%	0,32	4,4%	0,001	0,0%	7,22
MCA-LAV0002-00-2020-0006	6,70	93,4%	0,05	0,7%	0,43	5,9%	0,000	0,0%	7,18
MCA-LAV0052-00-2019-0002	6,70	94,8%	0,02	0,3%	0,04	0,5%	0,310	4,4%	7,07
MCA-LAV0052-00-2019-0005	6,70	97,2%	0,02	0,3%	0,04	0,5%	0,135	2,0%	6,89
MCA-LAV0002-00-2020-0010	6,70	97,4%	0,03	0,5%	0,14	2,1%	0,000	0,0%	6,88
MCA-LAV0052-00-2019-0001	6,70	98,2%	0,02	0,3%	0,03	0,5%	0,072	1,0%	6,83
MCA-LAV0052-00-2019-0003	6,70	98,7%	0,02	0,3%	0,04	0,6%	0,030	0,4%	6,79
MCA-LAV0052-00-2019-0004	6,70	98,8%	0,02	0,3%	0,03	0,5%	0,033	0,5%	6,78

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

El análisis detallado de la tabla de aportes a la concentración total para PM_{2.5} por receptor revela que la contribución de los diferentes proyectos es menor en comparación con la concentración de fondo, la cual domina de manera absoluta y transversal el escenario de calidad del aire. En todos los receptores evaluados, el fondo aporta un valor constante de 6,70 µg/m³, lo que representa entre el 59,9% (en la estación MCA-LAV0002-00-2020-0011) y el 98,8% (en la estación MCA-LAV0052-00-2019-0004) de la concentración total modelada.

Entre las fuentes específicas, el proyecto LAV0002-00-2020 se destaca como el mayor contribuyente individual, generando los aportes más significativos en receptores críticos como MCA-LAV0002-00-2020-0011 (4,42 µg/m³; 39,5%) y MCA-LAV0002-00-2020-0003 (3,80 µg/m³; 36,0%). Esta fuente es la principal responsable de impulsar las concentraciones totales más altas registradas en la red, llevando los niveles finales por encima de los 10,0 µg/m³ en su área de influencia directa.

Por otro lado, proyectos como LAV0052-00-2019 y LAM4656 muestran un impacto altamente focalizado y de baja magnitud. El proyecto LAV0052-00-2019 presenta un aporte máximo del 4,4% (0,310 µg/m³) en el receptor MCA-LAV0052-00-2019-0002, mientras que LAM4656 alcanza un máximo del 3,8% (0,28 µg/m³) en MCA-LAM4656-0001, manteniendo ambos contribuciones insignificantes o casi nulas en el resto del área de estudio.

Adicionalmente a este análisis de isopletras, se presentan los resultados de los aportes sobre los 1803 receptores evaluados en complemento al SVCA con la finalidad de ampliar la representatividad espacial de la modelación y detallar el comportamiento de la dispersión

atmosférica a lo largo de la red. Esta densificación de puntos de cálculo permite identificar con alta precisión los gradientes de concentración, cuantificar los impactos en áreas de sensibilidad particular y garantizar una verificación técnica rigurosa del cumplimiento normativo en aquellos sectores del territorio que no se encuentran bajo la cobertura directa de las estaciones fijas de monitoreo.

El análisis de la distribución de frecuencias para el Material Particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}) evidenció un escenario ampliamente favorable en términos de cumplimiento normativo. De acuerdo con los datos evaluados frente al límite máximo permisible de $50 \mu g/m^3$, el 99,7% de los registros (1798 datos) se ubica dentro de la categoría "Buena" del Índice de Calidad del Aire (ICA). Al observar el histograma, se destacó que la inmensa mayoría de las concentraciones (94,0%) fluctúa en el rango más bajo de exposición, entre 0 y $10 \mu g/m^3$. Si bien se identifica una proporción marginal e infrecuente de registros (0,3%) que supera el umbral normativo, clasificándose en la categoría "Aceptable", el comportamiento general ratifica una condición ambiental favorable en la región. Es preciso aclarar que los escasos receptores que registran estos valores atípicos se localizan en la colindancia inmediata de los proyectos. Por lo tanto, estas superaciones puntuales obedecen fundamentalmente a las limitaciones resolutivas y a la escala inherente de un modelo regional, el cual tiende a generar sobreestimaciones matemáticas en el campo cercano debido a la parametrización de las fuentes, más que a un riesgo real de incumplimiento ambiental en el territorio.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

Figura 29. Histograma e ICA receptores PM_{10} .

Por su parte, la evaluación estadística del Material Particulado fino ($PM_{2.5}$) refleja un escenario de cumplimiento normativo absoluto. El histograma demuestra que la práctica totalidad de los registros (99,6%) proyecta concentraciones mínimas, ubicándose en el primer rango de 0 a $5 \mu g/m^3$, lo cual representa valores muy inferiores al límite normativo establecido de 25

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta tendencia conservadora se ratifica al evidenciar la ausencia total de excedencias a la norma en los rangos superiores. En consecuencia, el 100,0% de los datos (1803 registros) se clasifica de manera unánime dentro de la categoría "Buena" del ICA. Esto certifica que, para la fracción más fina del material particulado, las condiciones atmosféricas modeladas no presentan riesgo alguno de superación normativa, asegurando una calidad del aire óptima y sostenida.



Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

Figura 30. Histograma e ICA receptores PM2.5.

Como complemento al análisis de dispersión, se presenta la estadística descriptiva de los aportes netos generados exclusivamente por los proyectos evaluados en los 1803 receptores permitiendo caracterizar la magnitud del impacto atribuible a las fuentes licenciadas; La tabla 12 resume los indicadores de tendencia central y dispersión, los cuales facilitan la comprensión de la distribución espacial de las emisiones y la identificación de valores atípicos, inherentes a la escala de modelación regional aplicada.

Tabla 12. Resumen estadístico análisis receptores.

Métrica $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10	PM2.5
Total, datos válidos	1803,0	1803,0
Valor promedio (Media)	3,4	0,4
Desviación estándar	6,2	0,7
Valor mínimo	0,2	0,0
Percentil 25% (Q1)	0,4	0,1
Mediana (Percentil 50%)	1,3	0,2
Percentil 75% (Q3)	4,4	0,6
Valor máximo	100,9	12,2

Fuente: ANLA - SIPTA, 2026

El análisis estadístico descriptivo de los 1803 receptores evidenció un comportamiento altamente asimétrico para ambos contaminantes, caracterizado por una inmensa mayoría de concentraciones mínimas y picos espaciales muy localizados:

- Para PM_{10} : La exposición general es sumamente baja, dado que el 75% de los registros se ubica por debajo de $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una mediana de apenas $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor máximo de $100,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eleva matemáticamente el promedio ($3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la dispersión ($6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$); sin embargo, este registro extremo es un dato atípico que obedece a sobreestimaciones puntuales del modelo en las inmediaciones directas de las instalaciones evaluadas, sin representar la condición ambiental real y generalizada de la cuenca atmosférica.
- Para $PM_{2,5}$: El escenario ratifica un cumplimiento normativo absoluto y holgado. Con un 75% de los datos inferiores a $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una media marginal de $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el impacto es estadísticamente insignificante. Incluso el valor máximo absoluto modelado ($12,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se sitúa por debajo del 50% del límite permisible anual ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), descartando por completo cualquier riesgo de excedencia en la red.

Tras el desarrollo del modelo regional y los análisis presentados, se estableció la representatividad de la modelación en el Alto San Jorge, permitiendo cuantificar los impactos acumulativos de los proyectos licenciados mediante un contraste con la información del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA). De acuerdo con el análisis detallado en las Tablas 9 y 10, se concluye lo siguiente:

- **Comportamiento del PM_{10} :** Al integrar los aportes netos de los proyectos con la concentración de fondo establecida ($10,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), las concentraciones totales estimadas en los receptores oscilaron entre $10,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación MCA-LAV0052-00-2019-0004) y un máximo de $48,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011). Estas magnitudes confirman el cumplimiento normativo en todo el sistema de vigilancia, manteniéndose por debajo del límite anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y sin registrar excedencias. El análisis evidencia que la concentración de fondo representa entre el 21,1% y el 94,6% de la concentración total en la región, cediendo su dominancia frente a las emisiones antrópicas únicamente en los sectores de mayor afectación.
- **Comportamiento del $PM_{2,5}$:** De manera similar, los valores totales proyectados (incluyendo el fondo de $6,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se movieron en un rango acotado, desde $6,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación MCA-LAV0052-00-2019-0004) hasta $11,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011), evidenciando aportes que cumplen estrictamente con el límite permisible anual de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La carga ambiental base condiciona de manera predominante el escenario, aportando entre el 59,9% y el 98,8% del total. En ambos contaminantes, el proyecto LAV0002-00-2020 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, se observó diferencias numéricas significativas y errores porcentuales amplios (llegando hasta el 150,3% en PM_{10} y 98,8% en $PM_{2,5}$). Sin embargo, es fundamental precisar que estas discrepancias son el reflejo inherente de la aplicación de un modelo a escala regional, el cual conlleva un nivel de incertidumbre propio

asociado a la resolución espacial y a la parametrización de las condiciones complejas del terreno. Asimismo, estas variaciones responden directamente al alcance de la simulación, la cual fue configurada para integrar de manera exclusiva las emisiones provenientes de los proyectos licenciados, excluyendo del cálculo otras fuentes antrópicas locales, dinámicas poblacionales y aportes regionales continuos que sí son captados físicamente por los equipos de medición en campo.

En otros términos, 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 pueden 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 área del Alto San Jorge. 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 incluido el fondo de $48,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $11,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$, 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 para el LAV0002-00-2020 ubicado en el sector sur del área de estudio.

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 concentraciones medidas significativas, particularmente en el área de influencia directa del proyecto LAV0002-00-2020. Se observó, asimismo, que la estación MCA-LAV0002-00-2020-0010, identificada entre las de mayor concentración en los registros de campo ($17,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $8,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$), presenta concentraciones totales modeladas ($11,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente) inferiores a dichos promedios medidos.

Esta diferencia indica que el aporte específico de los proyectos evaluados representa una fracción reducida de las concentraciones registradas en dicha estación, lo que sugiere que los niveles allí medidos se asocian en mayor medida a fuentes diversas presentes en la zona (tales como dinámicas locales no modeladas, flujo de terceros o aportes regionales), distintas de las actividades licenciadas objeto de seguimiento. En conjunto, los resultados

confirman condiciones de cumplimiento normativo en el área de estudio (manteniéndose por debajo de los límites anuales de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y presentando un ICA bueno para ambos contaminantes) y, a la vez, ofrecen información técnica útil para orientar las actividades de seguimiento y control hacia los receptores donde la contribución de los proyectos evaluados resulta comparativamente mayor.

Por tanto, en lo que respecta a la modelación se puede inferir que:

- No se identifican impactos acumulativos para el material particulado PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ de los POA's licenciados por la ANLA, debido a la distancia que se presenta entre los diferentes proyectos de la zona, generando que los aportes de contaminantes atmosféricos y los fenómenos de dispersión se presentan de forma local en cada proyecto y no se intercepten entre sí.
- Los aportes de la Central Térmica de Generación de Energía Eléctrica a Carbón asociado a las emisiones de la caldera 3 y caldera 3.2, son de baja magnitud y no son comparables con las concentraciones obtenidas del proyecto minero "Explotación y Transformación de Ferroníquel Cerro Matoso S.A."



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 de la Estrategia del Alto San Jorge, entre el enero de 2021 y diciembre del 2025, dio lugar a las siguientes conclusiones puntuales:

- El análisis de la estrategia de monitoreo atmosférico se basó en la información de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) proporcionada por tres proyectos. Dos de ellos corresponden a proyectos de explotación minera a cargo de Cerro Matoso S.A., asociados a los expedientes LAV0052-00-2019 y LAV0002-00-2020; el tercero corresponde a un proyecto termoeléctrico operado por Gecelca S.A. con expediente LAM4656. Los SVCA identificados en el área regionalizada del Alto San Jorge emplean estaciones de medición de contaminantes atmosféricos con tecnología automática y manual. Estas estaciones registran información de manera continua, en el caso de la tecnología automática, y cada tres días, en el caso de la tecnología manual, evaluando los parámetros PM_{10} y $PM_{2.5}$. El periodo de análisis de los datos reportados por estos sistemas comprende los años 2021 a 2025, con variaciones según las condiciones particulares de cada proyecto.
- El expediente LAV0002-00-2020 presenta debilidades importantes en la representatividad temporal del SVCA, con porcentajes inferiores al 75 % durante varios años, especialmente por el inicio del monitoreo, bloqueos comunitarios, traslados de estaciones e interrupciones operativas. Esta situación limita la capacidad de análisis anual y afecta la representatividad de los datos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en algunas estaciones.
- Los expedientes LAM4656 y LAV0052-00-2019 muestran un mejor comportamiento general en la representatividad de los datos, especialmente después de sus etapas iniciales de operación. Sin embargo, en 2025 se identifican estaciones con porcentajes inferiores al 75 %, por lo que se requiere fortalecer el seguimiento operativo de los SVCA para reducir interrupciones asociadas a fallas eléctricas, equipos o dinámicas sociales del territorio.
- Los análisis muestran que el contaminante PM_{10} , en las veinte (20) estaciones de monitoreo evaluadas cumplen con el nivel máximo permisible anual de $50 \mu g/m^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017, sin evidenciar concentraciones cercanas al incumplimiento normativo. En términos generales, las concentraciones presentan valores bajos o moderados, con comportamientos estables en el expediente LAM4656, disminución progresiva en las estaciones del expediente LAV0052-00-2019 y mayores niveles en algunas estaciones asociadas al expediente LAV0002-00-2020, posiblemente relacionados con las dinámicas propias de la actividad minera. Por otra parte, los resultados diarios (24 horas) en la mayoría de los registros se mantienen por debajo del límite máximo permisible de $75 \mu g/m^3$; sin embargo, se identificaron excedencias puntuales en estaciones de los expedientes LAV0002-00-2020 y LAV0052-00-2019, principalmente durante el año 2022. Estas excedencias se comportan como datos atípicos



dentro de la distribución general y no se reportan superaciones en los años 2024 y 2025, aunque se recomienda mantener el seguimiento de las tendencias futuras y fortalecer la representatividad de los datos en estaciones con periodos sin información.

- El contaminante PM_{2.5} en las veinte (20) estaciones de calidad del aire analizadas cumplen con el límite anual de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017, sin registrar concentraciones cercanas al incumplimiento. Los mayores niveles se presentan en estaciones del expediente LAV0002-00-2020, mientras que LAM4656 y LAV0052-00-2019 mantienen valores bajos y estables. A nivel diario, la mayoría de los registros cumple con el límite de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; las excedencias identificadas son puntuales y se consideran datos atípicos. Aunque en el periodo comprendido entre el año 2023 al 2024 se observaron incrementos asociados posiblemente a la temporada seca, en 2025 se evidencia una reducción de las concentraciones.
- Las distintas dinámicas observadas entre estaciones y expedientes resaltan la necesidad de un sistema capaz de captar variaciones espaciales y temporales con alta resolución. Por tanto, es necesario que las estaciones con tecnología de medición automática del expediente LAV0002-00-2020 registren los niveles de concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y sus variables meteorológicas con una frecuencia horaria.
- Las tendencias de las concentraciones de material particulado en las dos estaciones automáticas de Gecelca S.A, que reportan datos horarios, presentan condiciones homogéneas en horas de la mañana y de la tarde y en los registros diarios de lunes a domingo. Además, el registro anual muestra que los meses con mayores concentraciones en las dos estaciones fueron los de temporada seca, entre diciembre a marzo, y las menores entre julio y noviembre, posiblemente asociados a lluvias y bajas velocidades del viento.
- En el proyecto termoeléctrico de Gecelca S.A, con expediente LAM4656, se evidencian tendencias similares en la dispersión de PM₁₀ y PM_{2.5} en ambas estaciones, tanto en lo referente a las direcciones del viento predominantes como a las condiciones de velocidad del viento. Las direcciones noroeste, oeste y suroeste se destacan como las principales rutas de transporte de contaminantes hacia las estaciones.
- El análisis polar del proyecto termoeléctrico de Gecelca S.A, con expediente LAM4656, con velocidad del viento refuerza la importancia de este parámetro en el transporte y acumulación de contaminantes. Se registraron concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} más elevadas bajo velocidades moderadas (1–4 m/s), en especial desde el noroeste, indicando condiciones que favorecen el arrastre sin una dispersión eficiente.
- Es necesario la revisión de los criterios de micro localización de sensores meteorológicos del proyecto termoeléctrico de Gecelca S.A, con expediente LAM4656, debido a que los patrones observados de dirección del viento de una de las dos estaciones difieren con los de años anteriores, se recomienda revisar los criterios de ubicación, instalación y calibración de los instrumentos meteorológicos.

- El comportamiento de los vientos para la zona objeto de análisis, por medio de las rosas de viento de los proyectos LAM4656, LAV0052-00-2019 y LAV0002-00-2020 permitió evidenciar que la región presenta un régimen de vientos predominantemente de baja intensidad, con velocidades medias generalmente inferiores a 2 m/s y una marcada influencia de los cuadrantes occidental y noroccidental. No obstante, se identifican variaciones locales en la dirección predominante del viento, atribuibles a las características topográficas y geomorfológicas de cada sector, lo que genera patrones espaciales diferenciados de transporte atmosférico. En conjunto, los resultados muestran una capacidad de dispersión variable en la región, donde la circulación atmosférica responde a la interacción entre patrones regionales y condiciones locales.
- El análisis integrado de los gráficos polares de PM_{10} y $PM_{2.5}$ permitió determinar que la distribución de las concentraciones de material particulado está estrechamente condicionada por el comportamiento del viento. En general, las mayores concentraciones se asocian a direcciones específicas de procedencia del flujo atmosférico, lo que permite identificar sectores potenciales de aporte y procesos preferenciales de transporte de contaminantes. Asimismo, se observa que los patrones de concentración presentan diferencias entre estaciones, reflejando la influencia de fuentes y condiciones locales de dispersión. En términos generales, los resultados confirman que la dirección y la velocidad del viento constituyen factores determinantes en la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ registradas en los proyectos evaluados.
- El análisis de ciclos temporales muestra que las concentraciones de PM_{10} son consistentemente más altas que las de $PM_{2.5}$, especialmente en horarios pico (6:00–9:00 a. m. y 6:00–9:00 p. m.), lo cual está relacionado especialmente, con la resuspensión de material particulado por fuentes. Adicionalmente, se identificó que el particulado aumenta entre diciembre y marzo, coincidiendo con la temporada seca, en la cual se reduce la capacidad de remoción de partículas por baja precipitación.
- El análisis del Índice de Calidad del Aire (ICA) para el período 2025, evidencia condiciones favorables de calidad del aire en el área de análisis. Para PM_{10} , el 100 % de los registros en todas las estaciones se clasificaron en categoría "Buena", sin presencia de días en categorías superiores, lo que indica que las emisiones de partículas gruesas no generaron condiciones de riesgo para la salud de las comunidades aledañas durante el período evaluado. Para $PM_{2.5}$, la categoría "Buena" predominó en la totalidad de los expedientes, con valores que oscilaron entre el 83.9 % y el 100 % en LAV0002-00-2020, entre el 99.1 % y el 100 % en LAV0052-00-2019, y entre el 92.6 % y el 94.0 % en LAM4656; la categoría "Aceptable" se presentó de forma complementaria, con un máximo del 16.1 % en la estación QAC01–Puente Uré, sin que ninguna estación registrara días en categorías dañinas.
 - En términos de evolución histórica, la información consolidada en la **Tabla 6** para el período comprendido entre los años 2021 al 2025 muestra una tendencia positiva sostenida en los tres expedientes. El expediente LAV0052-00-2019 es el que registra el

avance más significativo: tras presentar días en categoría "Dañina a grupos sensibles" en el año 2023, para el año 2025 alcanza los mejores valores de toda la serie, con hasta el 100 % de los registros en categoría "Buena". El expediente LAM4656 mantiene el comportamiento más estable del conjunto, con una mejora progresiva en la proporción de días en categoría "Buena" a lo largo de la serie. La ausencia de categorías dañinas en los tres expedientes durante el año 2025, sumada a la tendencia de mejora observada, permite concluir que las medidas de gestión y control implementadas han tenido un efecto favorable sobre la calidad del aire en el área de influencia de los proyectos evaluados.

- Respecto al comportamiento del ICA para PM_{10} y $PM_{2.5}$, la mayoría de las concentraciones se ubican en la categoría "Buena", con registros esporádicos en categoría "Aceptable" durante meses específicos, influenciados por condiciones de estabilidad atmosférica, baja precipitación y otros factores que reducen la dispersión de contaminantes. Este comportamiento fue más evidente en las estaciones QAC07-Centro América y AQC03-Puerto Colombia del proyecto LAV0002-00-2020, donde en algunos periodos más del 40 % de los datos de $PM_{2.5}$ se clasificaron como "Aceptable". Esta variabilidad resalta la necesidad de mantener un monitoreo continuo y detallado, que permita anticipar cambios en la calidad del aire, así como intensificar los controles definidos en los programas de manejo ambiental cuando se presenten condiciones meteorológicas desfavorables, con el fin de minimizar la emisión de material particulado.
- Frente al modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos de la región se concluye que:
 - o Los resultados de la modelación indican que la concentración total estimada de PM_{10} (aportes de proyectos más concentración de fondo) osciló entre $10,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación MCA-LAV0052-00-2019-0004) y $48,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011), mientras que la de $PM_{2.5}$ se ubicó entre $6,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estación MCA-LAV0052-00-2019-0004) y $11,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (receptor MCA-LAV0002-00-2020-0011). En todos los receptores evaluados, las concentraciones totales se mantuvieron por debajo de los límites anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$), sin registrar excedencias. El escenario está dominado por la concentración de fondo, que representa entre el 21,1% y el 94,6% del total para PM_{10} , y entre el 59,9% y el 98,8% para $PM_{2.5}$, lo que indica que, a nivel regional, el aporte neto de los proyectos licenciados es menor frente a la carga ambiental base, cediendo su dominancia únicamente en los sectores de mayor afectación.
 - o En el ejercicio de validación, que contrasta los aportes modelados frente a las mediciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (año 2024), se observaron diferencias numéricas con errores porcentuales que alcanzaron hasta el 150,3% en PM_{10} y 98,8% en $PM_{2.5}$. Esta dispersión es esperable en un

modelo de alcance regional y se explica, fundamentalmente, porque los valores simulados representan de manera exclusiva 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 dinámicas poblacionales o flujo de terceros). Se identificaron casos de sobreestimación y subestimación asociados a la parametrización de condiciones topográficas complejas (SRTM1 de 30 metros) 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 concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ permite establecer que los impactos acumulativos y las zonas de mayor criticidad ambiental se concentran principalmente en el sector sur del área de estudio, asociados de manera directa e intensa a los aportes del proyecto LAV0002-00-2020. En consecuencia, las medidas de control y reducción de emisiones atmosféricas contempladas en los Planes de Manejo Ambiental de este proyecto —y de los demás expedientes evaluados— deben aplicarse con rigor para mantener bajos los niveles de inmisión. El seguimiento a través del Sistema de Información de Licencias Ambientales (SILA) resulta esencial para validar su cumplimiento y orientar las acciones pertinentes.
- El análisis de los receptores y su respectiva evaluación estadística confirma que el aporte aislado de los proyectos genera un impacto de muy baja magnitud a nivel regional donde la calidad del aire se mantiene en condiciones favorables y los valores máximos aislados corresponden a limitaciones matemáticas de resolución en el campo cercano del modelo regional, garantizando así un escenario general de cumplimiento y seguridad ambiental.
- Finalmente, los resultados de la modelación respaldan la ubicación de las estaciones definidas en la estrategia de monitoreo en el área del Alto San Jorge. Estas estaciones se localizan estratégicamente en áreas con aportes que requieren de seguimiento continuo, al ser atribuibles a expedientes específicos de alta influencia (como el LAV0002-00-2020), y, a la vez, se ubican en entornos representativos de las condiciones generales de calidad del aire, permitiendo capturar adecuadamente la fuerte influencia de la concentración de fondo en la zona.
- La revisión de las actuaciones judiciales y los procesos sancionatorios asociados al área de la Estrategia Atmosférica del Alto San Jorge evidenció que no existen órdenes judiciales, sentencias o medidas cautelares vigentes que establezcan obligaciones específicas relacionadas con la gestión, monitoreo o control de la calidad del aire y el ruido ambiental. No obstante,

se identificó un proceso sancionatorio activo relacionado con el presunto incumplimiento de medidas de manejo destinadas al control de emisiones fugitivas de material particulado derivadas del almacenamiento y manejo de carbón. Si bien dicho proceso no está asociado a incumplimientos de los estándares de calidad del aire ni a los programas de monitoreo atmosférico, constituye un antecedente relevante para la gestión del componente atmosférico, en la medida en que involucra medidas preventivas orientadas a minimizar la dispersión de partículas y los potenciales efectos sobre la calidad del aire en el área de influencia.

6 BIBLIOGRAFIA

ANLA. 2021. Actualización del Reporte de análisis regional de la Subzona Hidrográfica Alto San Jorge. Disponible en: <https://www.anla.gov.co/images/documentos/reportes-alertas/18-08-2022-anla-reporte-san-jorge-v12.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). 2010. Resolución 650 de 29 de marzo de 2010. Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-650-de-2010.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). 2010. Resolución 651 de 29 de marzo de 2010. Creación del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-651-de-2010.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). 2010. Resolución 2154 de 02 de noviembre de 2010. Ajuste del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-2154-de-2010.pdf>

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS). 2015. Decreto 1076 de 26 de mayo de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Decreto-1076-de-2015.pdf>

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/>

R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

7 ANEXOS

7.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA ESTACIÓN

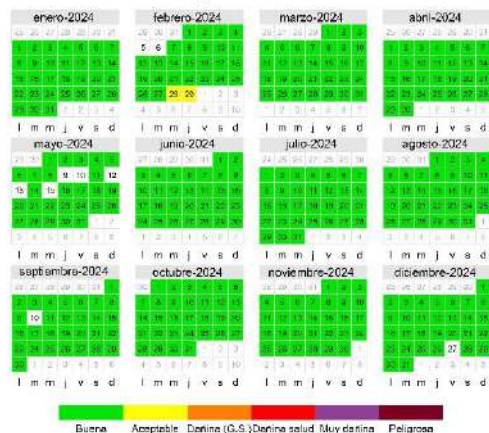
7.1.1 Expediente: LAV0002-00-2020



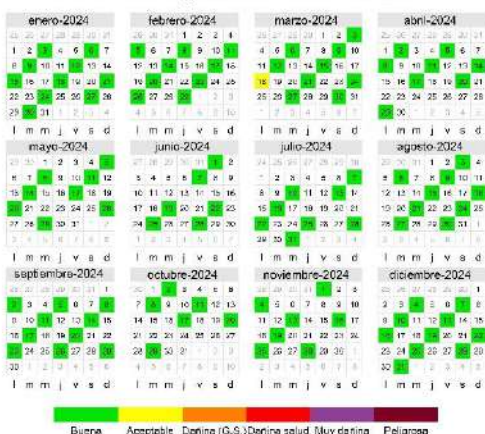
Cerro Matoso PM₁₀ QAC03 - Puerto Colombia 2024



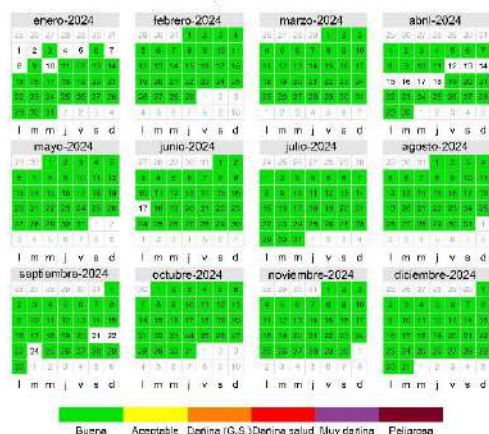
Cerro Matoso PM₁₀ QAC04 - Pueblo Flecha 2024



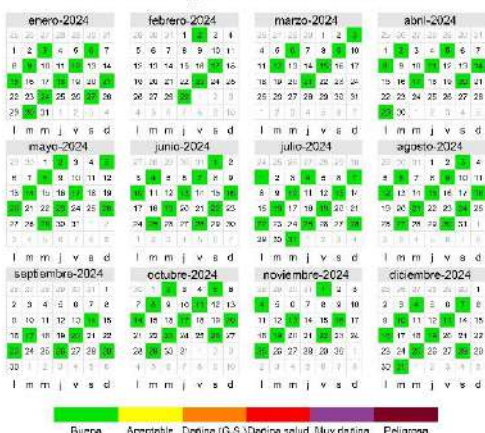
Cerro Matoso PM₁₀ QAC05 - San Jose de Ure 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC06 - La Odisea 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC07 - Centro America 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC08 - Tomo Rojo 2024

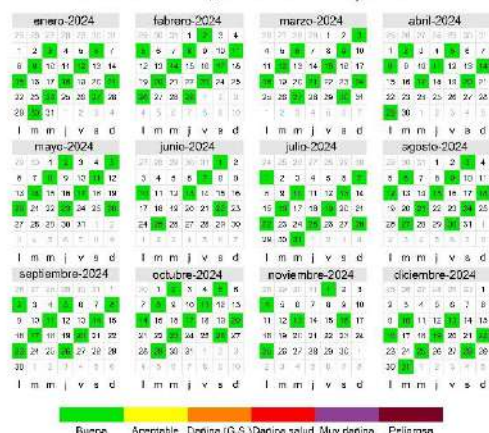
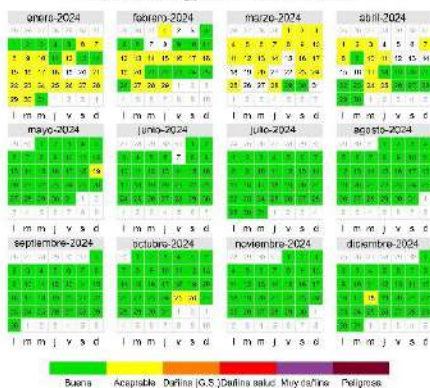


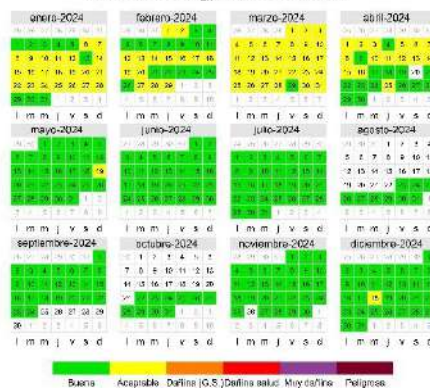
Figura 31. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM₁₀ - LAV0002-00-2020

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0002-00-2020

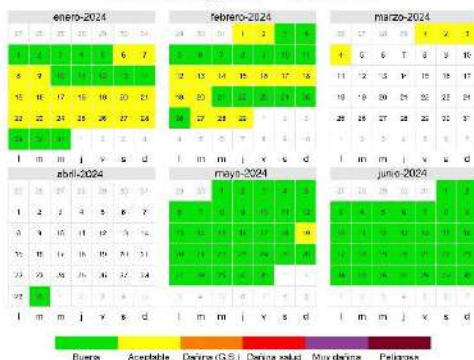
Cerro Matoso PM_{2.5} QA03 - Torno Roto 2024



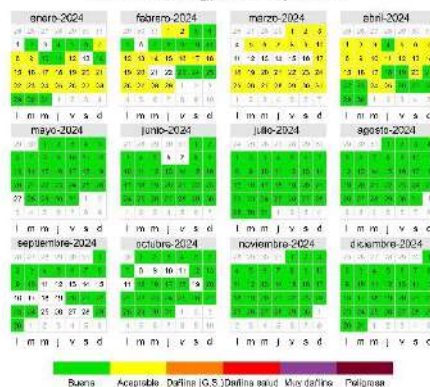
Cerro Matoso PM_{2.5} QA04 - Balsilla 2024



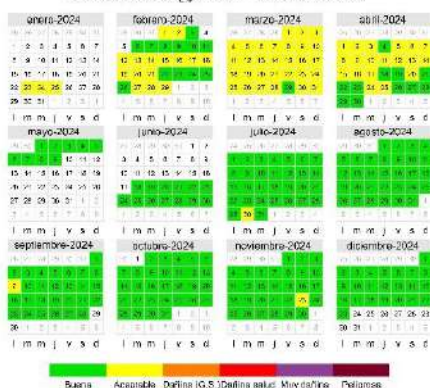
Cerro Matoso PM_{2.5} QA05 - Esmeralda 2024



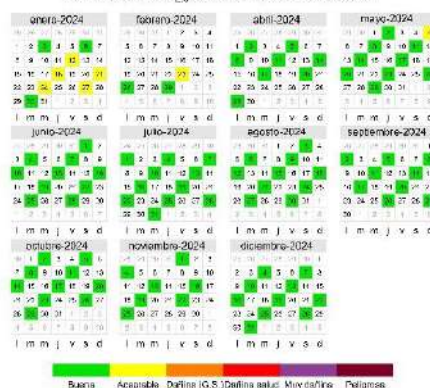
Cerro Matoso PM_{2.5} QA06 - Sajana 2024



Cerro Matoso PM_{2.5} QA001 - Puente Ure 2024



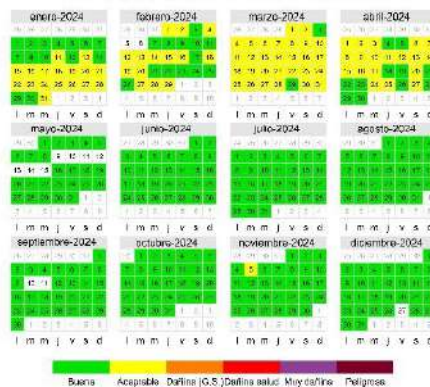
Cerro Matoso PM_{2.5} QA002 - Bocas de Ure 2024



Cerro Matoso PM_{2.5} QA003 - Puerto Colombia 2024



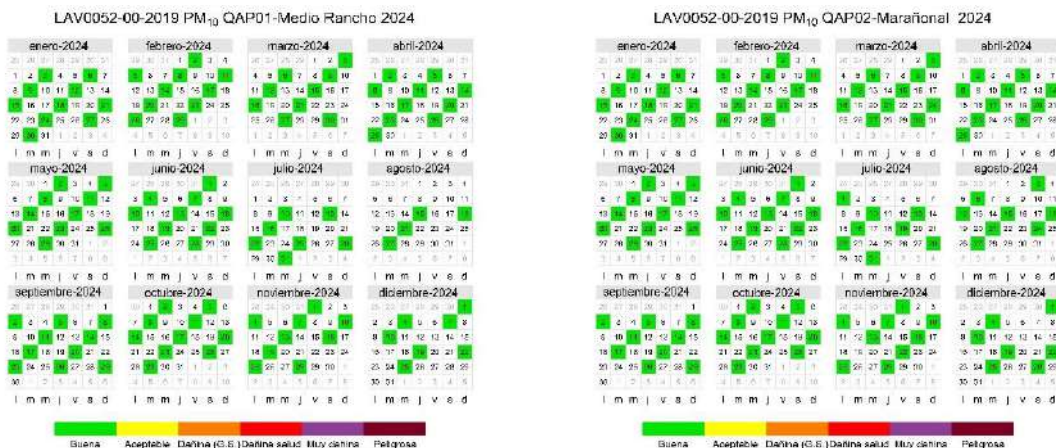
Cerro Matoso PM_{2.5} QA004 - Pueblo Flecha 2024





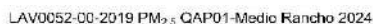
Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0002-00-2020

7.1.2 Expediente: LAV0052-00-2019





Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0052-00-2019



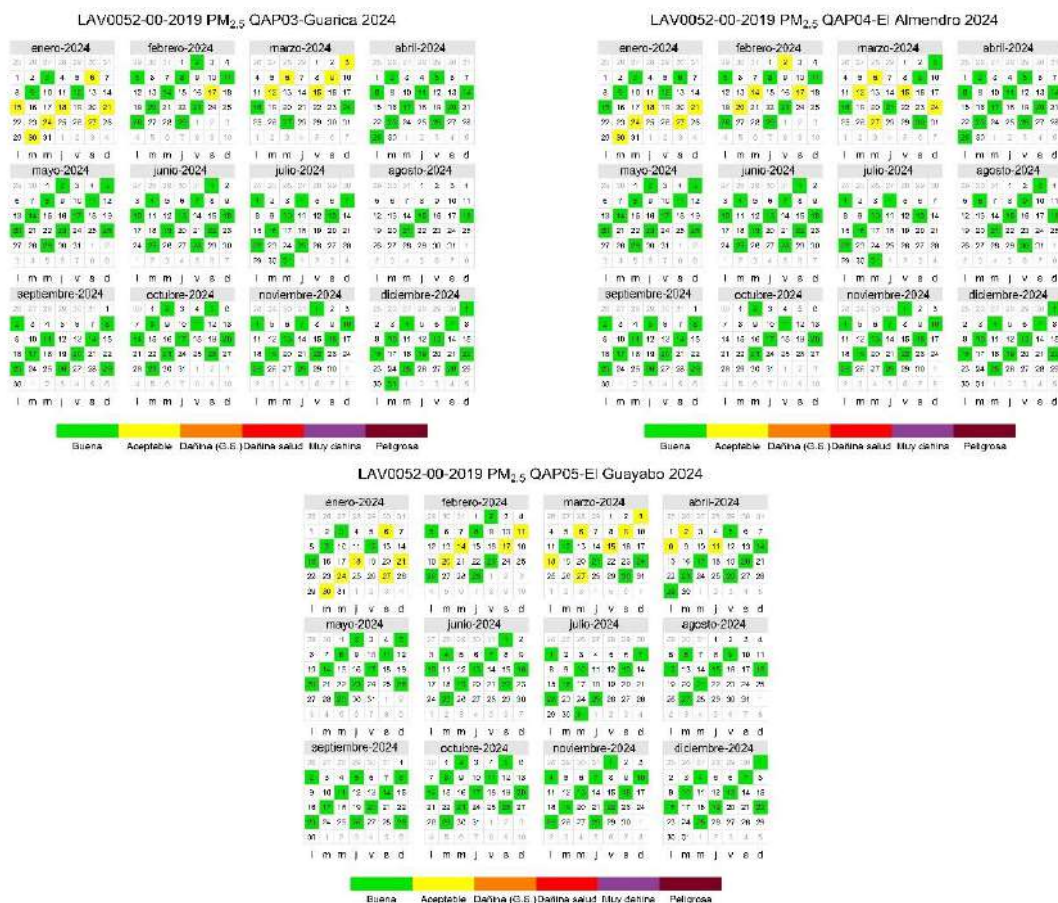


Figura 34. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5} - LAV0052-00-2019

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAV0052-00-2019

7.1.3 Expediente: LAM4656

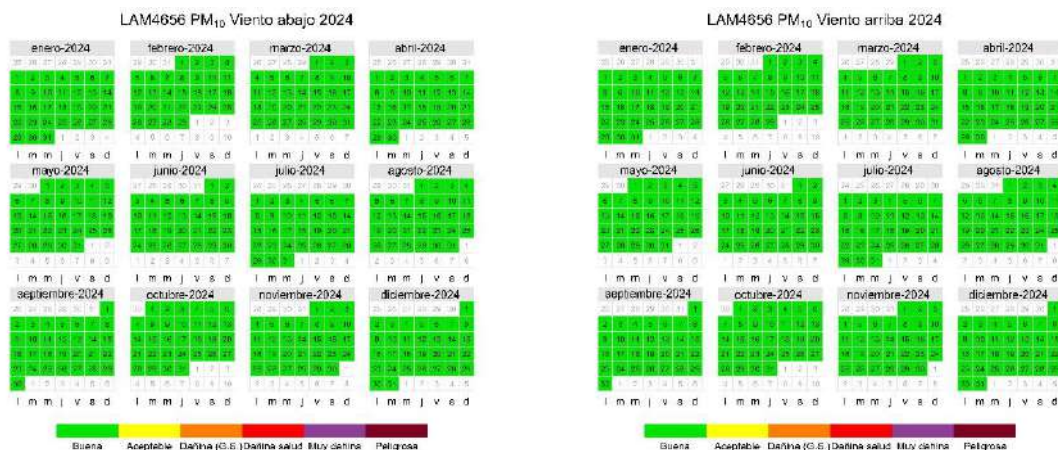


Figura 35. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM₁₀ - LAM4656

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

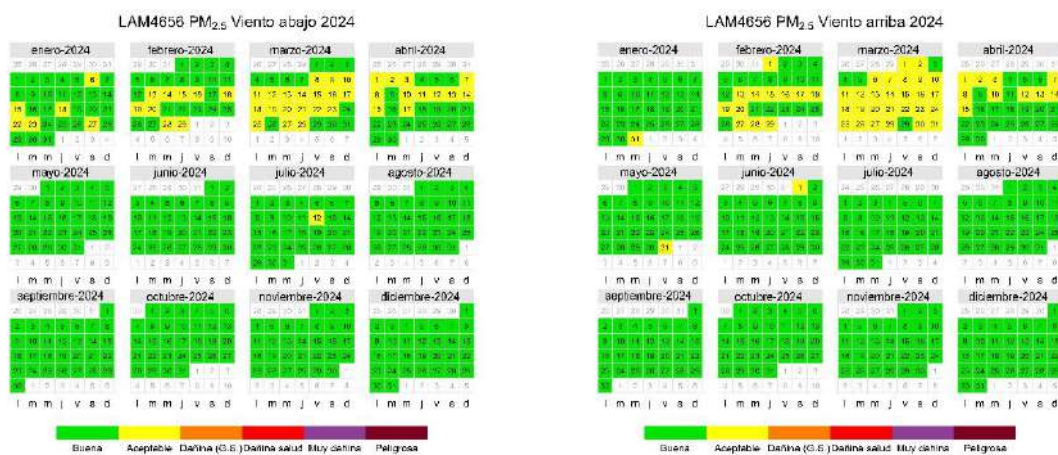


Figura 36. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5} - LAM4656

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

7.2 ANALISIS CICLOS TEMPORALES – LAM4656

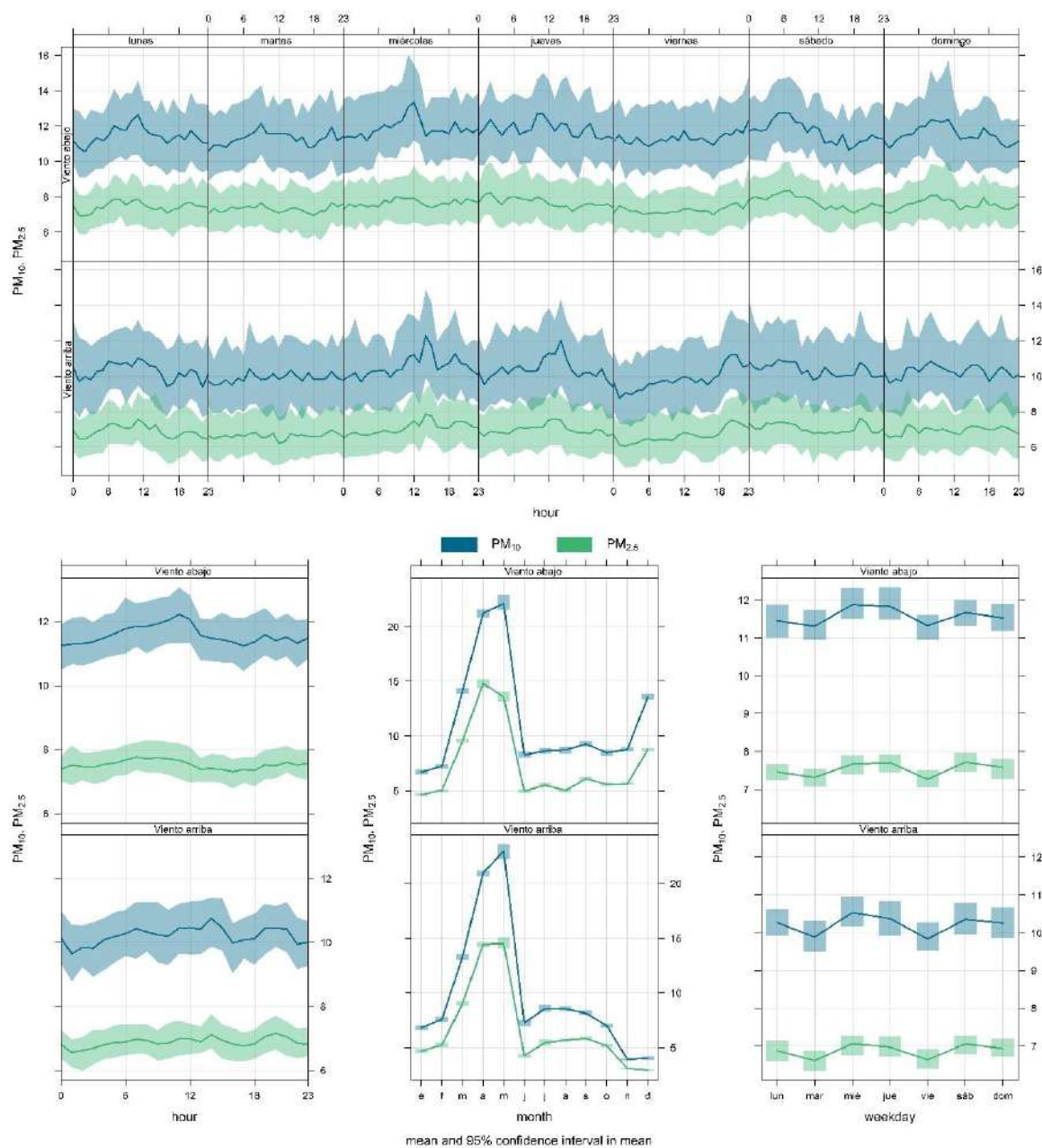


Figura 37. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2023

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656

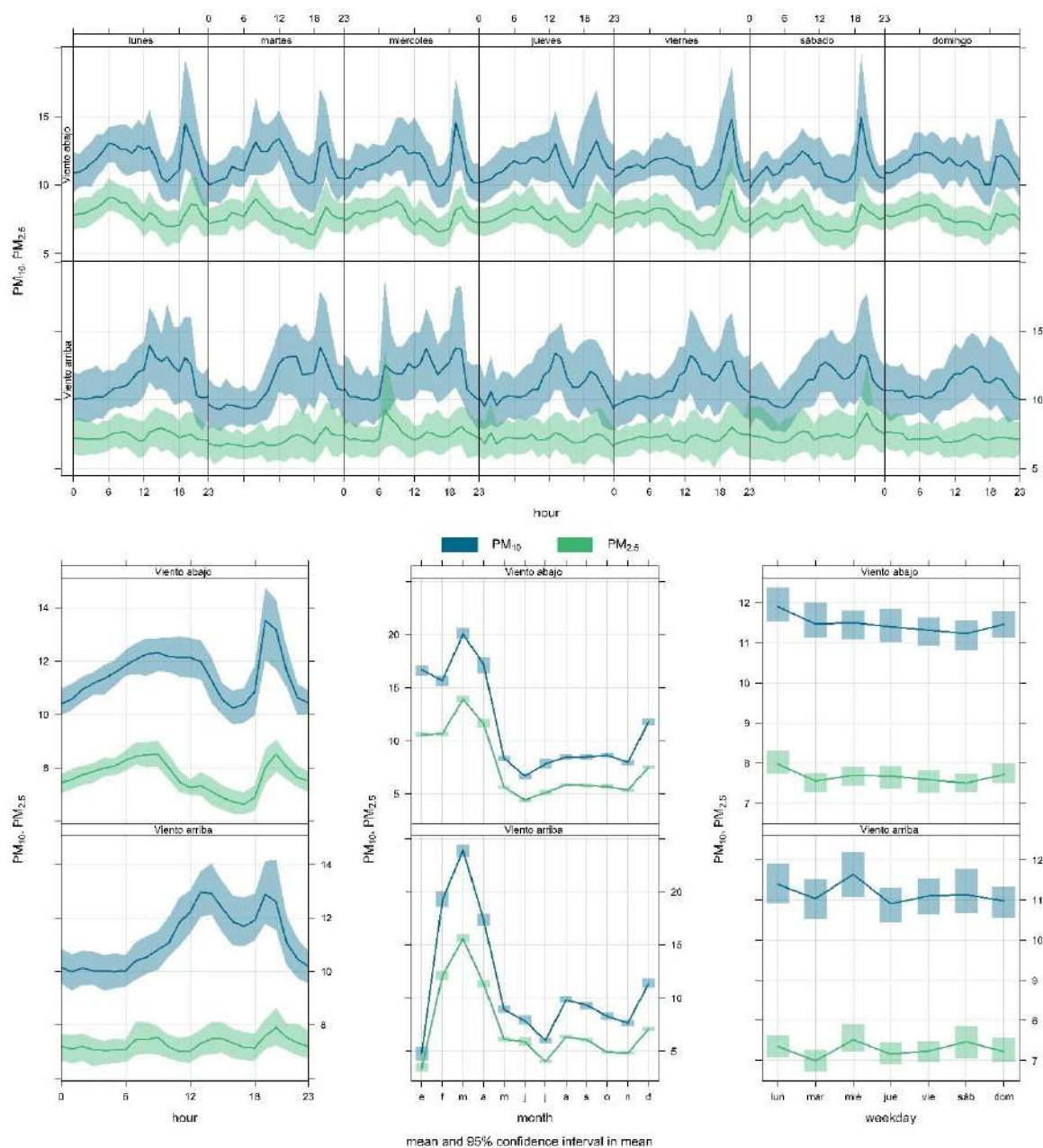


Figura 38. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2024

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por el expediente LAM4656