



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 (2020 – 2024)

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

**JUNIO
2025**

Irene Vélez Torres
Directora General

Jorge Alberto Sanabria Morales
**Subdirector Instrumentos
Permisos y Trámites
Ambientales**

Jorge Alberto Sanabria Morales
Coordinador
**Grupo de Regionalización
y Centro de Monitoreo**

Oscar Alexander Varila Quiroga
Líder
Análisis Regional

Wilfredo Marimon Bolívar
Sergio Ramírez Ajiaco
Líderes
**Centro de Monitoreo de los
Recursos Naturales**

Juan Pablo Ayala Robayo
Líder
Componente atmosférico

Neidy Mildred Daza Lesmes
Alexander Berbeo López
Javier Beltrán Maldonado
Jaime Andrés Fajardo Rodríguez
William Pabón
Profesionales
Componente atmosférico



CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	5
2	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE MONITOREO	8
2.1	CONDICIONES DE LUGAR.....	8
2.2	CONDICIONES DE TIEMPO	10
2.3	CONDICIONES DE MODO	11
3	ANÁLISIS REGIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE	12
3.1	INFORMACIÓN ANALIZADA	12
3.2	RESULTADOS.....	13
3.2.1	Análisis históricos de material particulado	13
3.2.2	Comportamiento de la velocidad y de la dirección del viento	22
3.2.3	Análisis conjunto de concentraciones de material particulado con el comportamiento del viento	24
3.2.4	Análisis de ciclos temporales.....	28
3.2.5	Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA.....	31
3.3	MODELACIÓN DE LA DISPERSION DE MATERIAL PARTICULADO PM ₁₀ Y PM _{2.5}	36
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	45
5	BIBLIOGRAFIA	49
6	ANEXO 1: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA ESTACIÓN.....	50
6.1	Expediente: LAV0002-00-2020.....	50
6.2	Expediente: LAV0052-00-2019.....	53
6.3	Expediente: LAM4656	55



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférico	6
Tabla 2. Ubicación Proyectos del Alto San Jorge con obligaciones asociadas a la estrategia de monitoreo atmosférico de la ANLA	9
Tabla 3. Ubicación de las estaciones de calidad del aire que reportan bajo la estrategia de monitoreo atmosférica	9
Tabla 4. Cantidad de registros diarios de calidad del aire para Alto San Jorge	12
Tabla 5. Descripción general del Índice de Calidad del Aire - ICA	31
Tabla 6. Relación de Categorías ICA $PM_{2.5}$ para los años 2021 a 2024	34
Tabla 7. Proyectos incluidos en modelación de Alto San Jorge	36
Tabla 8. Estadísticos Concentraciones anuales sobre receptores discretos – Escenario Actual	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de Alto San Jorge	10
Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM_{10}	14
Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de $PM_{2.5}$	15
Figura 4. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de PM_{10}	16
Figura 5. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de $PM_{2.5}$	17
Figura 6. Distribución de los promedios diarios de PM_{10}	19
Figura 7. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM_{10}	20
Figura 8. Distribución de los promedios diarios de $PM_{2.5}$	21
Figura 9. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$	22
Figura 10. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2024 – LAM4656 23	
Figura 11. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2024 – LAM4656	25
Figura 12. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2024 – LAM4656	26
Figura 13. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM_{10}) en 2024 – LAM4656	27



Figura 14. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2024 – LAM4656.....	28
Figura 15. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre julio del 2022 a diciembre del 2024 – LAM4656	30
Figura 16. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2023.....	57
Figura 17. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2024.....	58
Figura 18. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{10}	32
Figura 19. Índices de calidad del aire de 2024 ICA $PM_{2.5}$	33
Figura 20. Isopletras PM_{10} - Tiempo de exposición anual.....	42
Figura 21. Isopletras $PM_{2.5}$ - Tiempo de exposición anual	43
Figura 22. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{10} - LAV0002-00-2020	51
Figura 23. Índices de calidad del aire de 2024 ICA $PM_{2.5}$ - LAV0002-00-2020.....	53
Figura 24. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{10} - LAV0052-00-2019	54
Figura 25. Índices de calidad del aire de 2024 ICA $PM_{2.5}$ - LAV0052-00-2019.....	55
Figura 26. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{10} - LAM4656.....	55
Figura 27. Índices de calidad del aire de 2024 ICA $PM_{2.5}$ - LAM4656	56





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.

CVS: Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge

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.





2 INTRODUCCIÓN

Este documento presenta el análisis de las concentraciones del periodo 2020 a 2024, 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 del 2020 al 31 de diciembre del 2024; 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, 2025

Teniendo en cuenta que el expediente LAV0002-00-2020 integró los expedientes LAM1459 y LAV0053-00-2015 en el año 2020, para efectos de unificación en el análisis, en el presente documento se denominarán las estaciones correspondientes bajo el expediente “Cerro Matoso”.

Adicionalmente, 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 2020 al 31 de diciembre de 2024. Esta revisión permitió identificar la presencia de dos sistemas de vigilancia de calidad del aire (SVCA) en la zona de estudio: CERRO MATOSO S.A. y GECELCA3. Se constató que las estaciones de monitoreo utilizadas por estos sistemas son las mismas





que figuran en los expedientes de los proyectos previamente mencionados. En consecuencia, el análisis de los datos se llevó a cabo con base en los resultados de estas estaciones 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=eyJrIjoibGZlZmVudC0ZTgtZTI1Zi00YzE1LTg2YWYtMjUyYzkyN2U1N2VmIiwidCI6IjZmMWNjYjk0LWFkYTUtNDM3Zi04NzZkLTQ5NzkyMGNjYmUxOCIsImMiOjR9>

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, 2025

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	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
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

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025

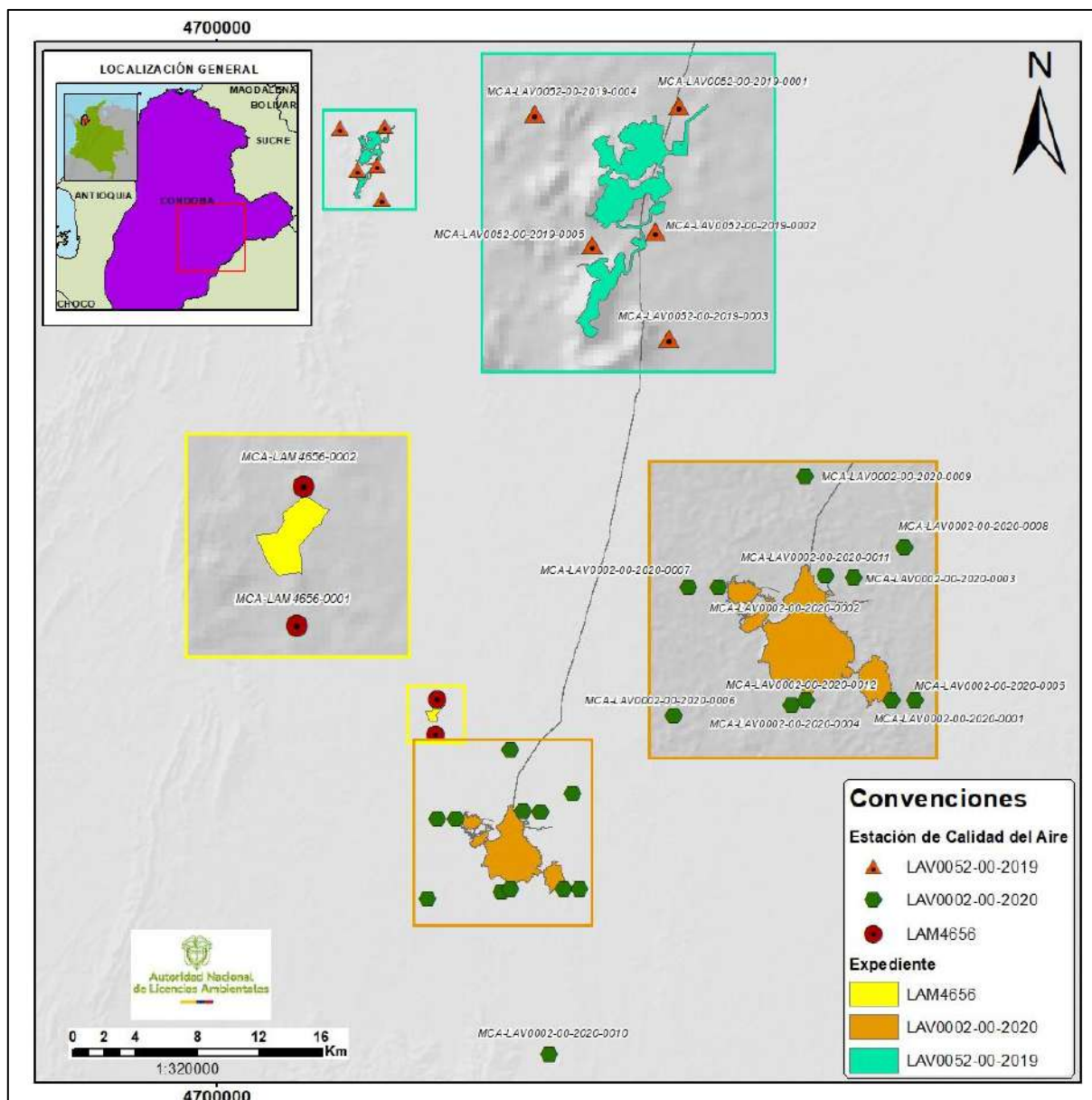


Figura 1. Localización de proyectos y estaciones con estrategia de monitoreo del área de Alto San Jorge

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025

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 2010³ y ajustado por la Resolución 2154 de 2010⁴, 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 25 de la Resolución 2254 de 2017⁵, la información del estado de la calidad del aire deberá migrarse también al Subsistema de Información sobre la Calidad del Aire (SISAIRE), conforme a los tiempos de reporte establecidos en el Artículo Quinto de la Resolución 651 de 2010⁶.

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 2015⁷.

Conforme a lo anterior, en el siguiente capítulo se precisan los análisis históricos que abarcan los años de 2020 a 2024, con el fin de determinar la tendencia del estado de la calidad del aire.

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

4 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”

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

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

7 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 esta 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

AÑOS	EXPEDIENTE	PM ₁₀		PM _{2.5}	
		# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)	# ESTACIONES QUE MONITOREARON	RANGO DE REPRESENTATIVIDAD (%)
2020 – 2024	LAV0002-00-2020	12	22 - 100	12	12 - 100
2022 – 2024	LAV0052-00-2019	5	85 - 100	5	82 - 100
2022 – 2024	LAM4656	2	42 - 100	2	42 - 100

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025

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 los años 2020 y 2021, periodo en el cual se da inicio al monitoreo regional del SVCA de dicho expediente. Como caso particular, las estaciones Esmeralda (MCA-LAV0002-00-2020-0002) y Puerto Colombia (MCA-LAV0002-00-2020-0005) presentaron representatividades en torno al 50 % en el año 2024, como consecuencia de la presencia de bloqueos por parte de las comunidades aledañas al área del proyecto que impidieron el acceso a las estaciones monitoreo por parte del personal de la sociedad, afectando el funcionamiento óptimo de los equipos de medición. Por otra parte, también es posible identificar algunas interrupciones temporales de las estaciones de monitoreo, asociado principalmente por fallas eléctricas u operativas del SVCA ajenas a la operación del proyecto. A pesar de estas incidencias, es importante destacar que la mayoría de las estaciones de monitoreo cumplieron con el porcentaje mínimo de validez para el registro de datos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ 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. En los años subsiguientes, la representatividad superó el 75 %.

Finalmente, en el expediente LAV0052-00-2019 se muestra que su representatividad temporal mínima es superior al 80 % en el periodo de análisis, permitiendo realizar sus análisis de cumplimiento y representación anual para todo su SVCA.

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 diecinueve (19) estaciones del área de cubrimiento de la estrategia, se da cumplimiento al nivel máximo permisible anual de PM_{10} establecido en la Resolución 2254 de 2017, correspondiente a $50 \mu g/m^3$. Asimismo, no se identifican altos niveles de concentración que se encuentren cerca del incumplimiento normativo anual.

Por otra parte, se muestra que los mayores niveles de concentración se reportan en las estaciones de monitoreo de Cerro Matoso (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 $20 \mu g/m^3$, 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 niveles promedios que se acercan a los $10 \mu g/m^3$, lo cual 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.



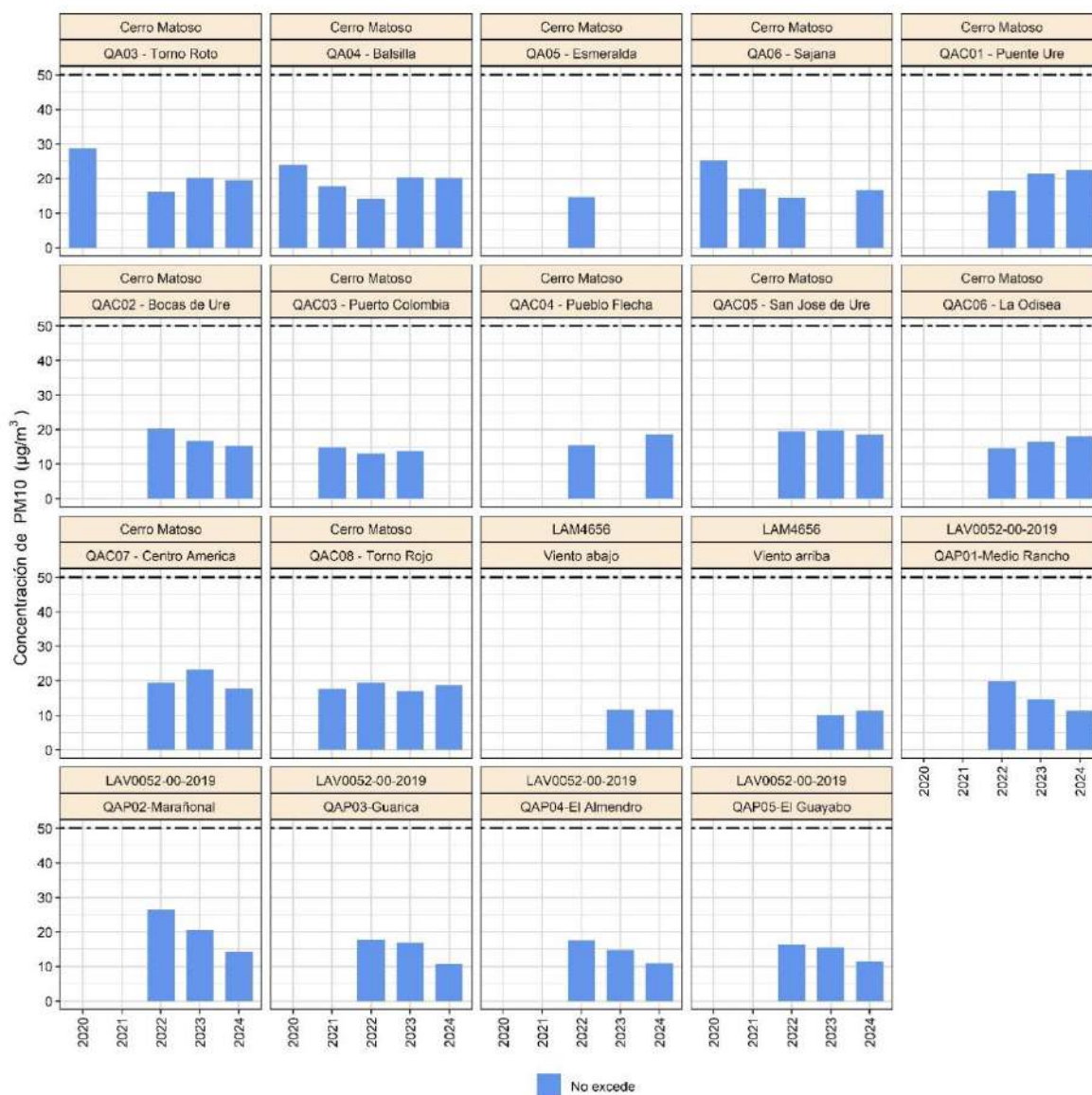


Figura 2. Comportamiento histórico de promedios anuales de PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

Respecto al material particulado $PM_{2.5}$, como se observa en la Figura 3, se evidencia que en ninguna de las diecinueve (19) 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.

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 QAC05 – San José de Uré (MCA-LAV0002-00-2020-0010) y QAC07 – Centro América (MCA-LAV0002-00-2020-0007) tienden a presentar los mayores niveles de concentración, superando los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en los periodos 2022 y 2023 principalmente.

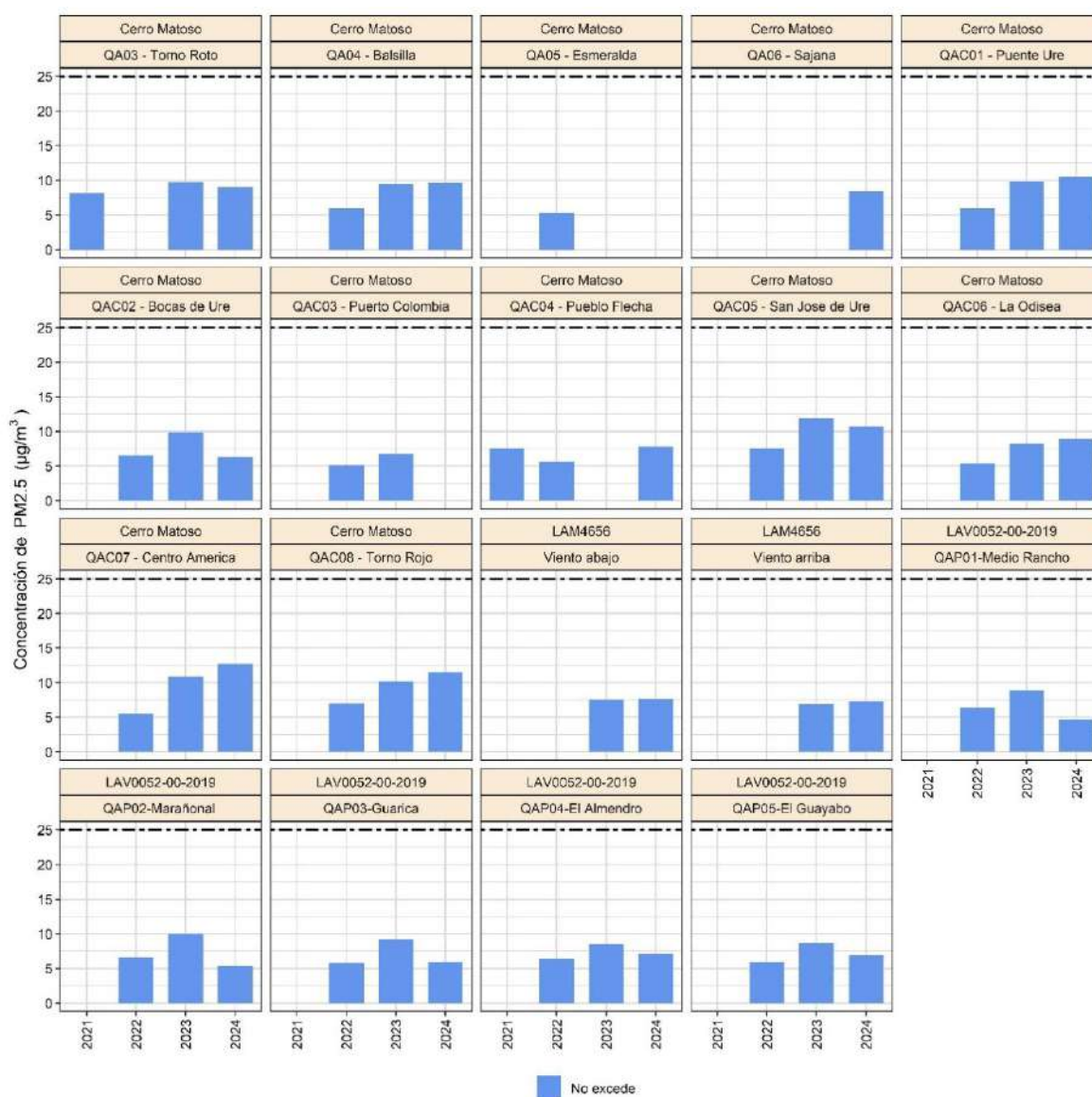


Figura 3. Comportamiento histórico de promedios anuales de $PM_{2.5}$

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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, generalmente inferiores a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

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 5 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 2022 o 2023, mientras que otras presentan una mayor estabilidad o una ligera disminución hacia 2024. 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).

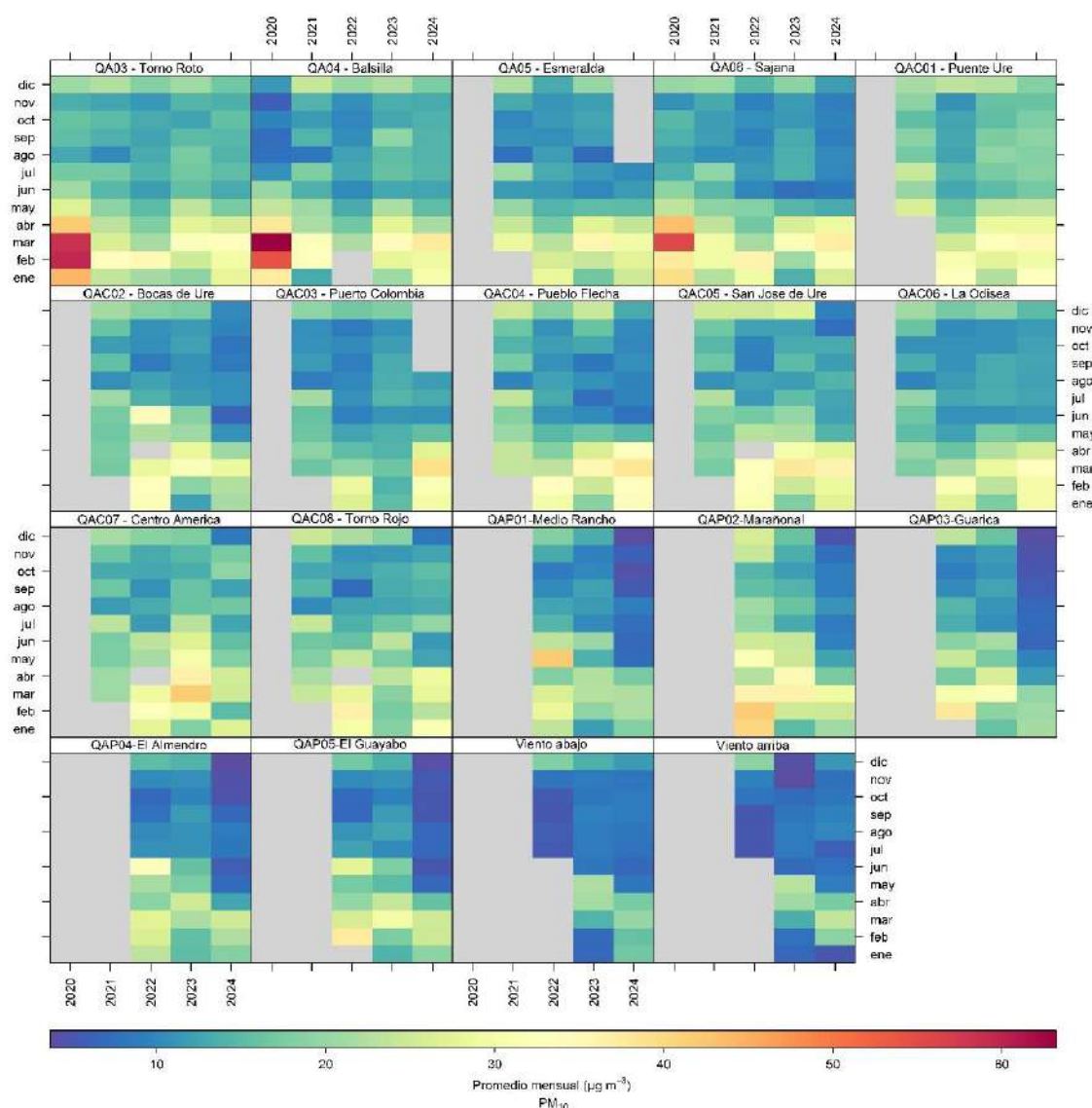


Figura 4. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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 ocurrir entre enero y abril, coincidiendo con la temporada seca o de bajas precipitaciones en la zona de estudio. No obstante, es de anotar que, en años recientes, estos

niveles se han atenuado durante este período, especialmente en las estaciones de monitoreo del expediente LAV0002-00-2020.

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.

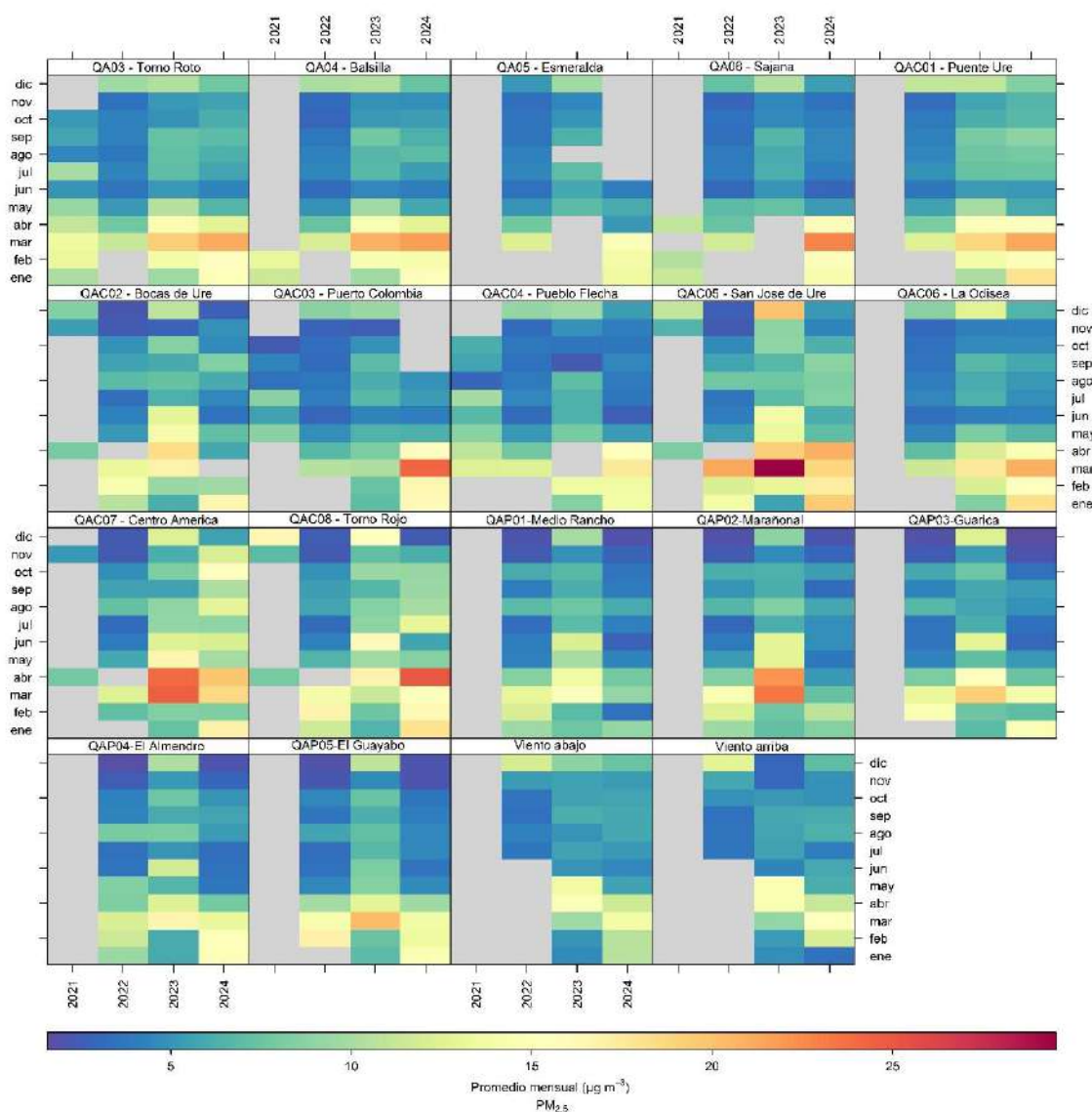


Figura 5. Comportamiento histórico de los promedios mensuales de PM_{2.5}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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, estas 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 enero a abril. En contraste, los meses de junio a diciembre, caracterizados por una mayor humedad e incremento de precipitaciones, presentan los niveles más bajos.

En ese sentido, en los años de 2023 y 2024 durante la temporada seca, se evidencia 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 puede ser atribuida al inicio de las quemas agrícolas o de biomasa que suceden en la región en la temporada seca.

La Figura 6 y Figura 7, presentan el comportamiento diario de los niveles de concentración de PM_{10} , 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 $75 \mu g/m^3$. Si bien la tendencia general indica cumplimiento, se registraron algunas excedencias puntuales en estaciones de los expedientes LAV0002-00-2020 (Dos estaciones) y LAV0052-00-2019 (Tres estaciones). Estas excedencias, identificadas como datos atípicos en el análisis de distribución, no son representativas de la tendencia global de la información. Además, cabe destacar que en los años 2023 y 2024 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.



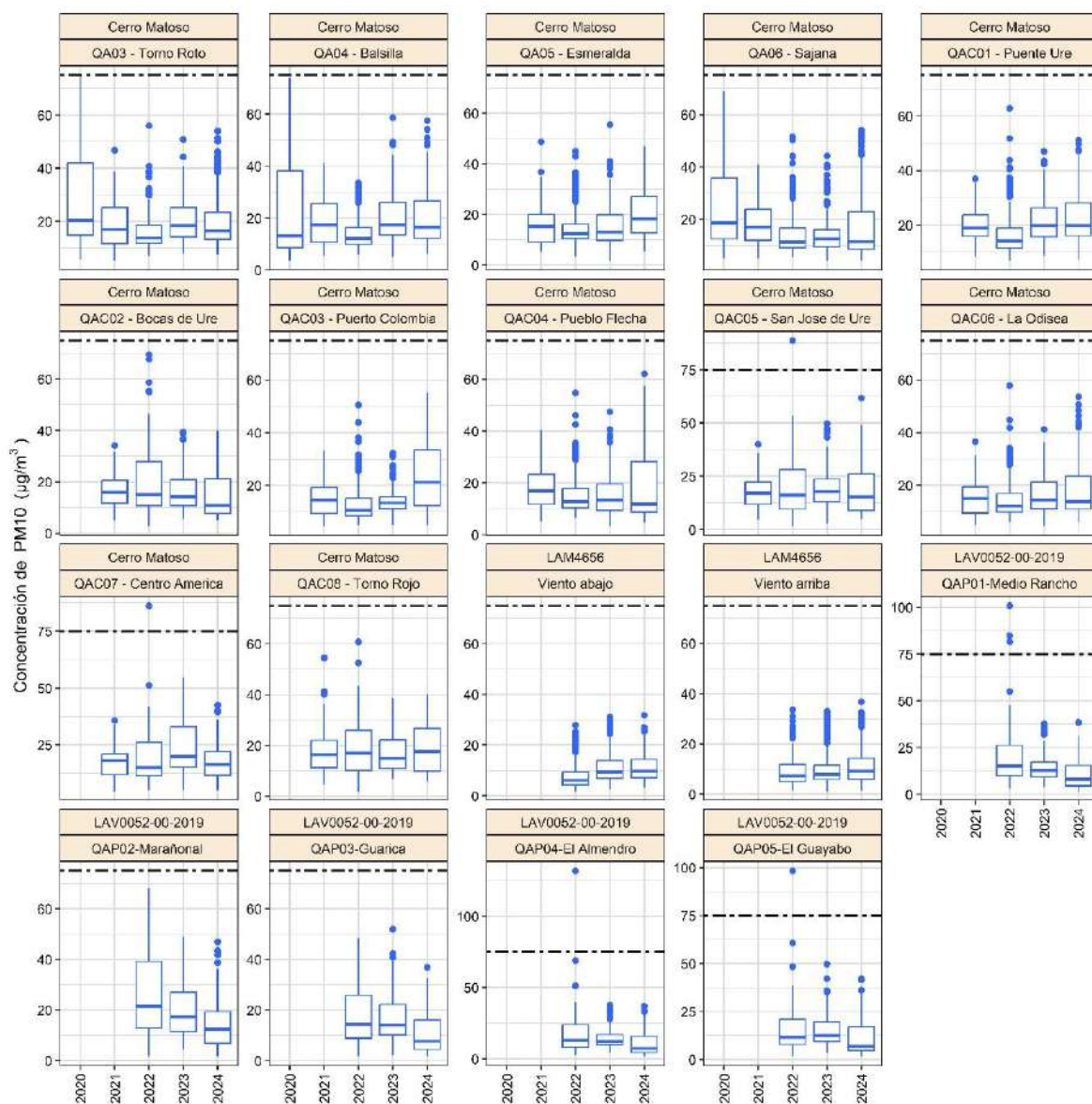


Figura 6. Distribución de los promedios diarios de PM₁₀

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

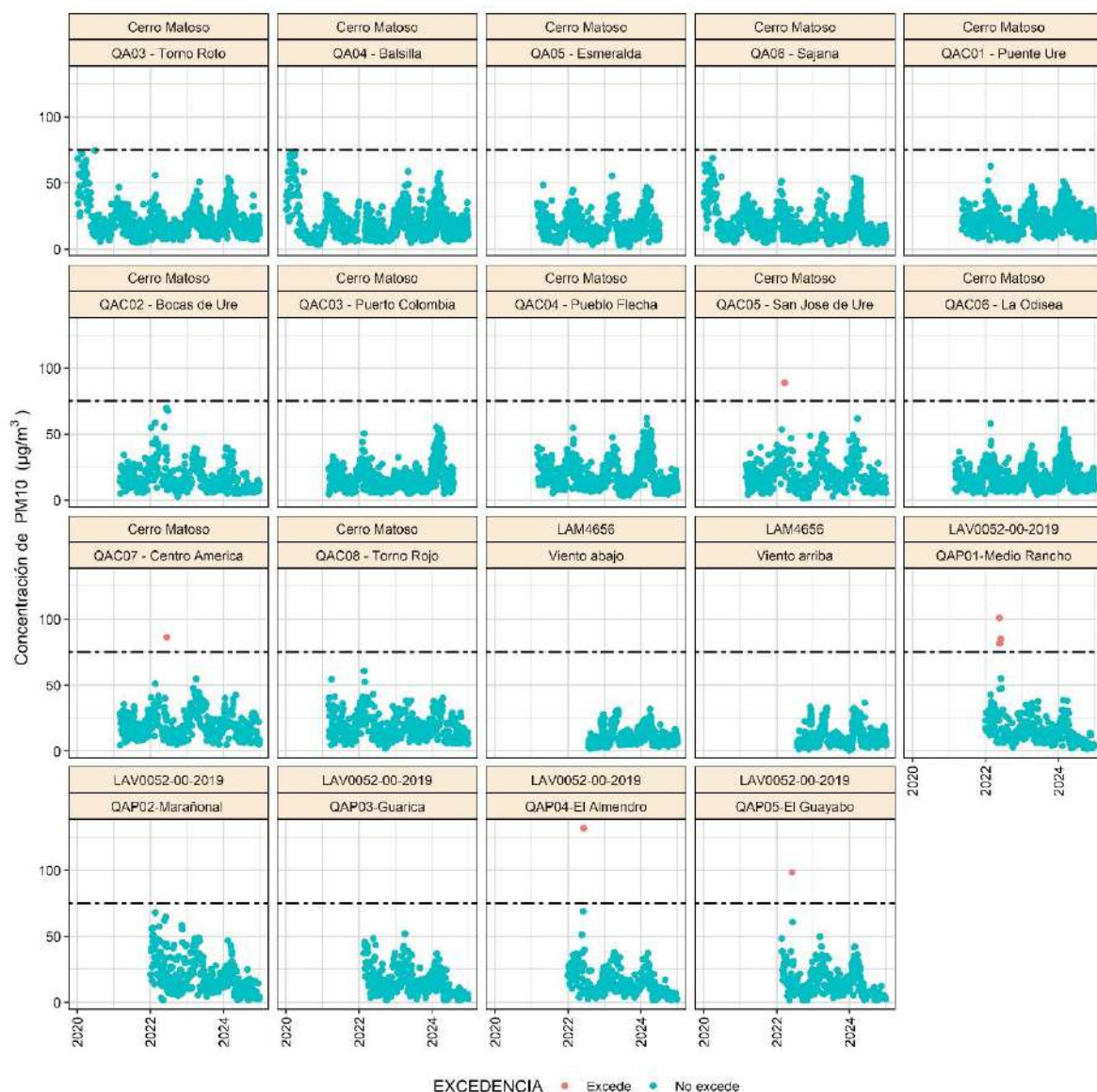


Figura 7. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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 excedencias del nivel máximo permisible de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, establecido por la Resolución 2254 de 2017. Estas excedencias se presentaron en las estaciones Torno Roto (MCA-LAV0002-00-2020-0011), Puerto Colombia (MCA-LAV0002-00-2020-0005), Centro América (MCA-LAV0002-00-2020-0007) y San José de Ure (MCA-LAV0002-



00-2020-0010) del expediente LAV0002-00-2020; y Marañonal (MCA-LAV0052-00-2019-0002) del expediente LAV0052-00-2019 entre los años 2023 y 2024 principalmente. 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. A pesar de lo anterior, se recalca la necesidad de un análisis riguroso de las causas puntuales asociadas con la ocurrencia de estos valores.

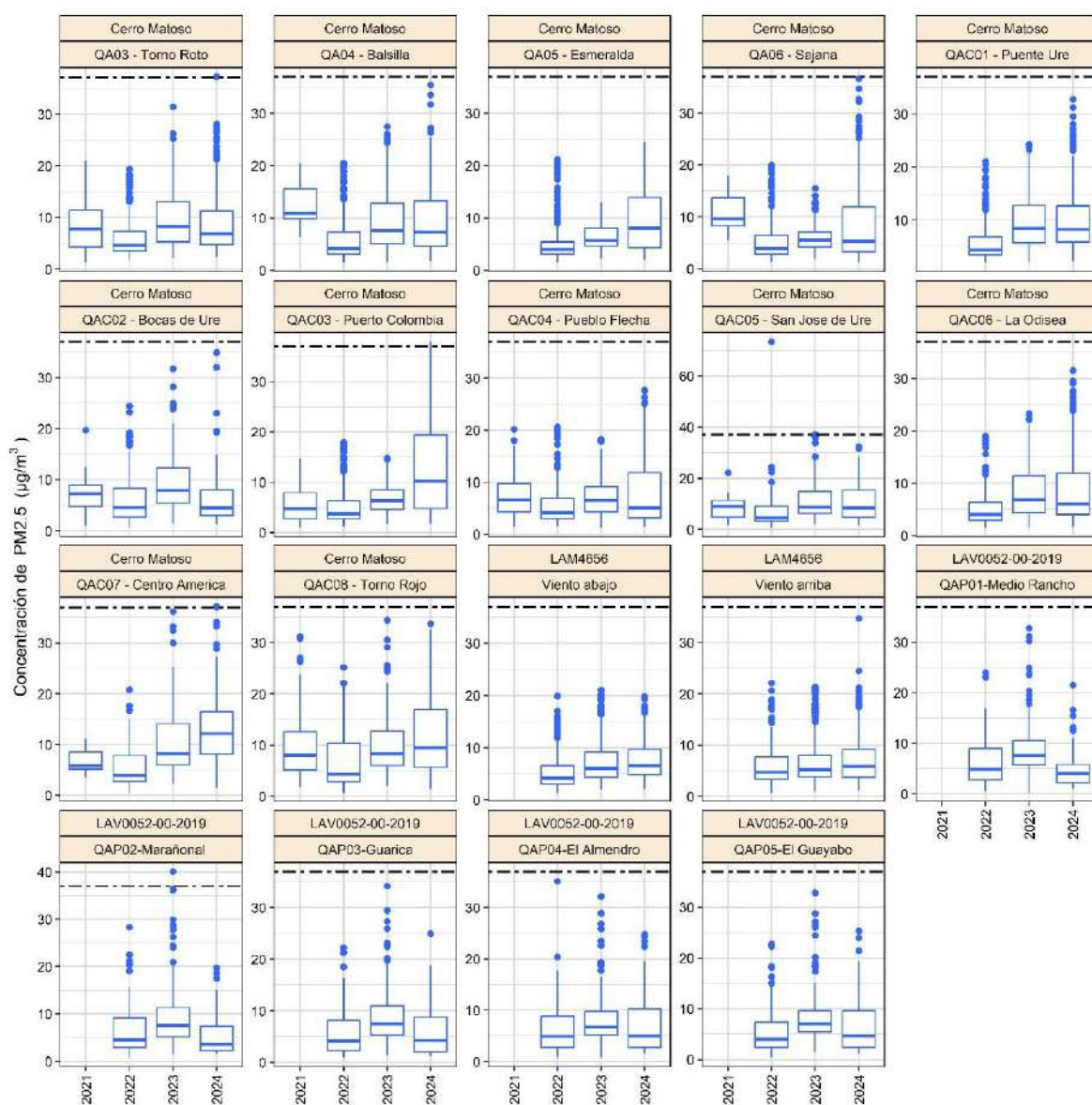


Figura 8. Distribución de los promedios diarios de PM_{2.5}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 a partir de los datos radicados por los expedientes LAV0002-00-2020, LAV0052-00-2019 y LAM4656

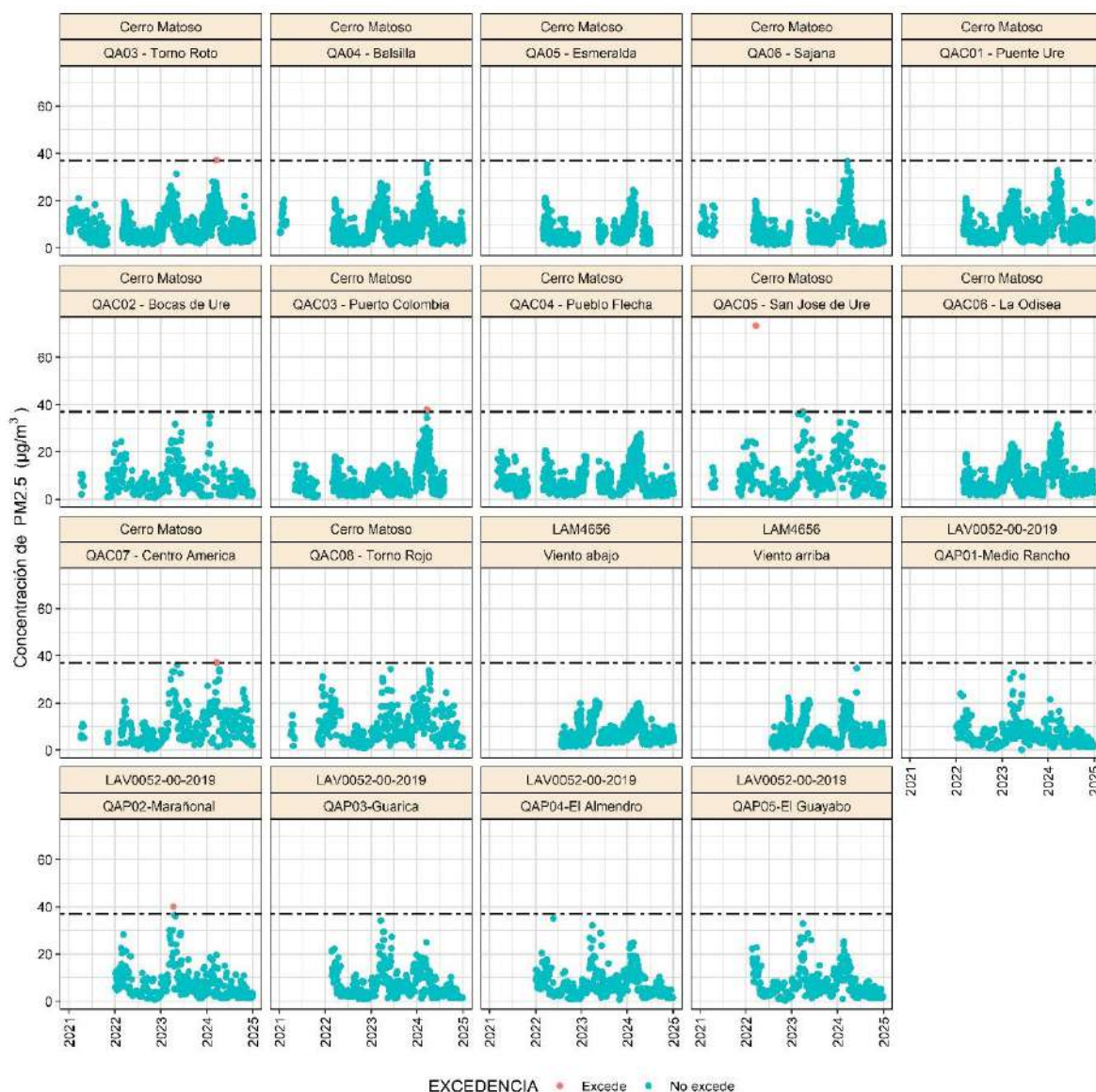


Figura 9. Tendencia temporal de las concentraciones diarias de PM_{2.5}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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.

4.2.2 Comportamiento de la velocidad y de la dirección del viento

El análisis de velocidad y de la dirección del viento corresponde al periodo 2024, de las dos (2) estaciones de calidad del aire del proyecto del sector de energía con número de expediente LAM4656, Gecelca S.A., el cual reportó datos horarios.

En cuanto los datos de velocidad y de dirección del viento de los proyectos mineros en el área de la Estrategia de Monitoreo Atmosférica del Alto San Jorge, se detectó que para sus estaciones de monitoreo de calidad de aire se está reportando por parte de los proyectos un dato diario y no se conoce si es el máximo, mínimo o promedio; por lo tanto, no fue posible elaborar las rosas de viento de estas estaciones de monitoreo con un nivel de confiabilidad adecuado.

A continuación, se presentan las rosas de vientos de las estaciones de monitoreo de calidad de aire llamadas Viento abajo y Viento arriba del proyecto LAM4656 (Figura 10).

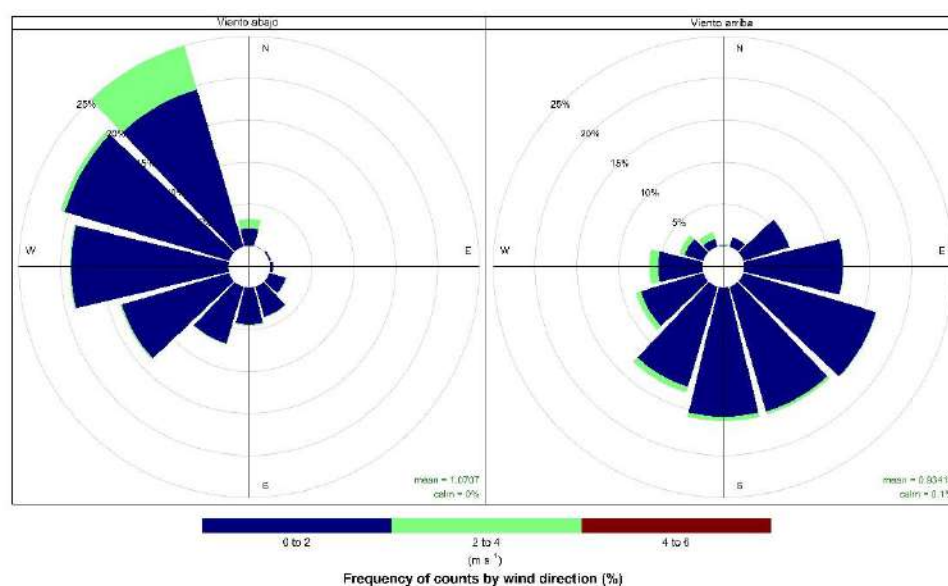


Figura 10. Rosas de viento para las estaciones de calidad del aire en 2024 – LAM4656

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

Las rosas de viento para el periodo 2024 se obtuvieron de los datos horarios anuales, en estas se evidencian tendencias tanto de las velocidades como de las direcciones del viento de las dos estaciones, las cuales están a una distancia aproximada de 2.3 km.

En cuanto las velocidades del viento para las dos estaciones, se presentan porcentajes bajos en el rango de (2 a 4 m/s) especialmente en las direcciones norte – oeste – sur.

Para la estación de monitoreo Viento Abajo, el viento proviene predominantemente del noroeste y se desplaza al sur este, este resultado presenta un cambio abrupto respecto a la rosa de vientos generada para el periodo anual inmediatamente anterior 2023, ya que se invirtió la dirección del viento para esta estación. Por otro lado, la estación Viento Arriba presentó un comportamiento en la dirección del viento similar al periodo 2023, en donde el viento proviene predominantemente desde el sur, sureste y este y se desplaza hacia el norte, noroeste y oeste.



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en relación con la dirección del viento durante el periodo de estudio y el comparativo con los datos del periodo anterior, se identifica la necesidad de revisar los criterios de micro localización, así como las condiciones de instalación y funcionamiento de los instrumentos meteorológicos en las estaciones de calidad del aire analizadas. Esta revisión, es fundamental para garantizar la representatividad de las mediciones de viento y, en consecuencia, mejorar la precisión en la identificación de las trayectorias probables de los contaminantes atmosféricos emitidos. Una adecuada ubicación y calibración de los sensores, permite fortalecer el análisis espacio temporal de las concentraciones registradas, optimizando la interpretación de los patrones de dispersión y el rastreo de posibles fuentes emisoras.

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

Con el objetivo de profundizar en el análisis de tendencias de concentración, se ha llevado a cabo un cruce de los datos horarios de concentración registrados durante el año 2024 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 2024, se identifican patrones espaciales y temporales relevantes en las concentraciones de material particulado (PM_{10}) para las estaciones evaluadas (Figura 11):

- Estación Viento Abajo: Las concentraciones más altas de PM_{10} , cercanas a $13 \mu g/m^3$, provienen principalmente de las direcciones noroeste, oeste y suroeste, y se presentan a lo largo de todo el día. Este patrón sugiere que las fuentes emisoras en estas direcciones tienen una influencia constante, sin un comportamiento claramente definido en función del horario, lo que podría estar relacionado con actividades locales o condiciones meteorológicas estables.
- Estación Viento Arriba: Las mayores concentraciones de PM_{10} , cercanas a $25 \mu g/m^3$, se asocian con vientos provenientes del noroeste, con un predominio en el horario de 16:00 a 22:00 horas. Este comportamiento sugiere una posible influencia de fuentes emisoras o condiciones de acumulación de contaminantes en horas de la tarde y primeras horas de la noche.



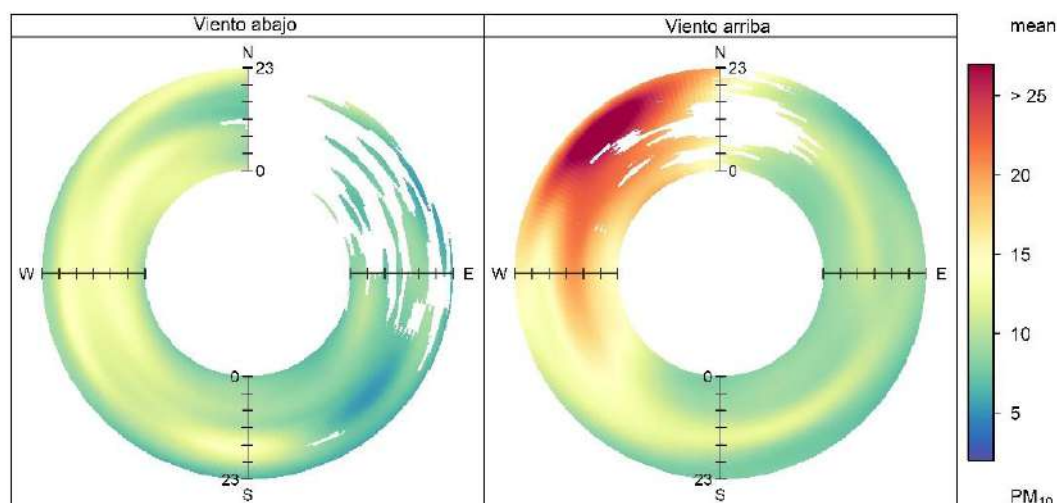


Figura 11. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire (PM₁₀) en 2024 – LAM4656

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

El análisis de las concentraciones de PM_{2.5} revela tendencias similares al PM₁₀ en las dos estaciones, especialmente en cuanto a las direcciones predominantes del viento. A continuación, se presentan los resultados detallados por estación (Figura 12):

- Estación Viento Abajo: Se observa que las concentraciones más altas de PM_{2.5}, cercanas a 9 µg/m³, se registran principalmente cuando el viento proviene de las direcciones noroeste, oeste y suroeste. Este patrón se mantiene de manera constante a lo largo del día, lo que sugiere una influencia estable de las fuentes emisoras ubicadas en esas direcciones, sin una variabilidad significativa en función del horario.
- Estación Viento Arriba: En esta estación, las mayores concentraciones de PM_{2.5}, cercanas a 18 µg/m³, se asocian con vientos provenientes del noroeste, con un predominio en el horario de 16:00 a 22:00 horas. Este comportamiento podría estar vinculado a actividades específicas que incrementan las emisiones de PM_{2.5} en las horas de la tarde y noche, o a condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de partículas en ese rango horario.

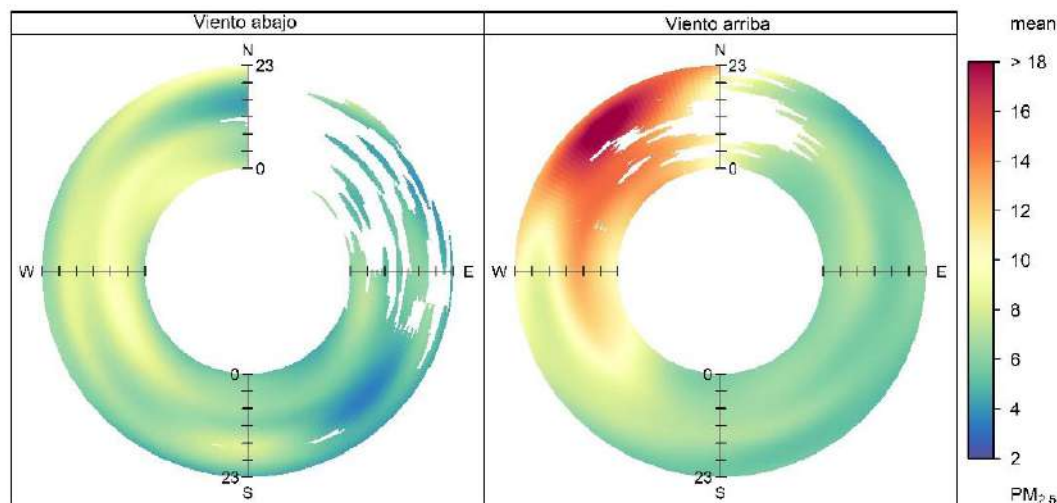


Figura 12. Gráficos polares horarias anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2024 – LAM4656

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

Al reemplazar la variable hora del día por la velocidad del viento en los diagramas polares anuales, se obtuvo una visualización complementaria que permite evaluar la influencia combinada de la dirección y la velocidad del viento en las concentraciones de PM_{10} (Figura 13). Los resultados para cada estación son los siguientes:

- Estación Viento Abajo: Se observa que las concentraciones más altas de PM_{10} , aunque no resultan significativamente elevadas (alrededor de $20 \mu g/m^3$), se presentan principalmente cuando la velocidad del viento supera los 3 m/s y proviene del noroeste. Este patrón podría indicar un transporte puntual de partículas desde esa dirección bajo condiciones de viento moderado.
- Estación Viento Arriba: En este caso, se identifican concentraciones significativas de PM_{10} cercanas a $25 \mu g/m^3$ asociadas a vientos del noroeste. Adicionalmente, se registran concentraciones cercanas a $20 \mu g/m^3$ cuando el viento proviene de las direcciones norte y oeste, dentro de un rango general de velocidades entre 1 y 4 m/s. Esto sugiere una posible acumulación de contaminantes bajo velocidades bajas o moderadas, o una influencia persistente de fuentes ubicadas en dichas direcciones.

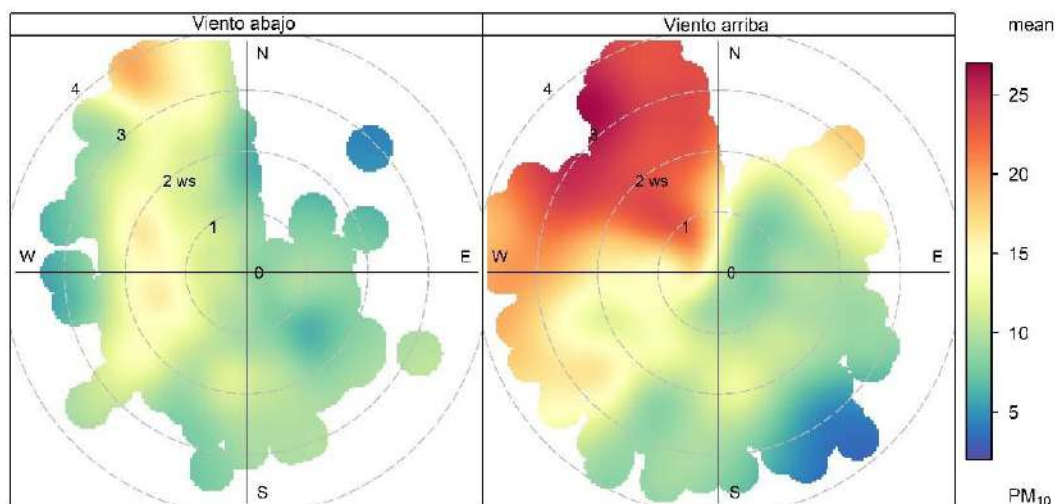


Figura 13. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire (PM₁₀) en 2024 – LAM4656

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

El análisis de las concentraciones de PM_{2.5} revela tendencias similares a las observadas para PM₁₀ en ambas estaciones, especialmente en lo que respecta a las direcciones predominantes del viento. La relación entre las concentraciones y las velocidades del viento se describe a continuación (Figura 14):

- Estación Viento Abajo: Las concentraciones más altas de PM_{2.5}, cercanas a 11 µg/m³, se presentan cuando la velocidad del viento supera los 3 m/s y proviene del noroeste. Este patrón sugiere un posible transporte de partículas desde esa dirección bajo condiciones de viento moderado a fuerte, similar a lo observado con PM₁₀.
- Estación Viento Arriba: Se identifican concentraciones significativas de PM_{2.5}, cercanas a 18 µg/m³, asociadas a vientos del noroeste. Asimismo, se registran concentraciones en torno a 14 µg/m³ cuando el viento proviene de las direcciones norte y oeste, en un rango de velocidades entre 1 y 4 m/s. Esto podría estar indicando una influencia de fuentes emisoras constantes o acumulación de partículas bajo condiciones de viento débil a moderado.

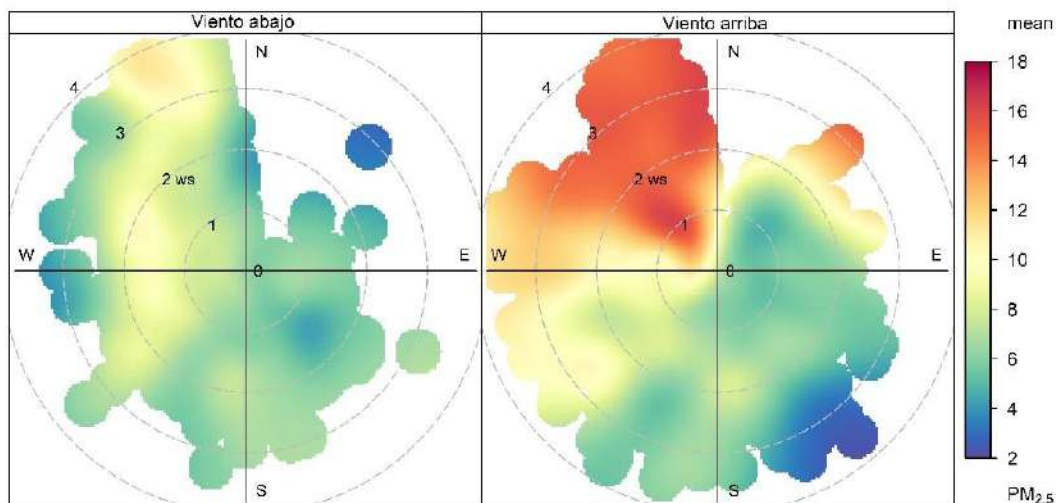


Figura 14. Gráficos polares anuales para las estaciones de calidad del aire ($PM_{2.5}$) en 2024 – LAM4656

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

4.2.4 Análisis de ciclos temporales

Teniendo en cuenta, que el análisis de ciclos temporales requiere registros horarios de información de calidad del aire y solo las dos estaciones con tecnología automática del proyecto termoeléctrico de Gecelca S.A, con expediente LAM4656, reportan los datos de esta manera, el análisis de ciclos temporales se realizó únicamente en estas estaciones de monitoreo.

En el análisis de ciclos temporales, se verificaron las concentraciones para los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$. con resultados del periodo de tiempo comprendido entre julio de 2022 a diciembre del 2024.

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 verde y PM_{10} en azul.

- Variación diaria: en la Figura 15 a), se detalla que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$, presentan dos picos de concentraciones, el primero entre 6:00 y 9:00 am, horarios que se asocian especialmente a la influencia del tráfico matutino; y el segundo de 6:00 y 9:00 pm, relacionadas con las horas de regreso; y las concentraciones más bajas se observan en la madrugada (0:00 – 5:00 a. m.). Este comportamiento es similar de lunes a viernes, mientras que los fines de semana (sábado y domingo) los picos son más suaves. En general, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ son más altas bajo condiciones de viento abajo, lo que puede indicar una menor dispersión de contaminantes en esa situación.



- Variación horaria: el ciclo temporal interpretado por medio de la Figura 15 b, permite confirmar los picos bimodales horarios descritos anteriormente y asociados al tráfico matutino y vespertino. Adicionalmente, se puede identificar que las concentraciones
- Variación mensual: considerando la Figura 15 c, la cual consolida la tendencia de 2022 - 2024, se observan las mayores concentraciones tanto de PM_{10} como de $PM_{2.5}$ de diciembre a marzo, coincidiendo con las condiciones de temporada seca que favorecen la acumulación del material particulado. En los meses intermedios, las concentraciones disminuyen por el inicio de la temporada de lluvias y la alta humedad que facilitan la remoción de partículas.
- Variación semanal: teniendo en cuenta la Figura 15 d), se puede identificar ligeras variaciones de las concentraciones durante la semana, con valores más altos para los miércoles y viernes; y los niveles más bajos para el domingo; y las diferencias entre viento arriba y abajo, se mantienen con valores de material particulado mayores con viento abajo.

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.



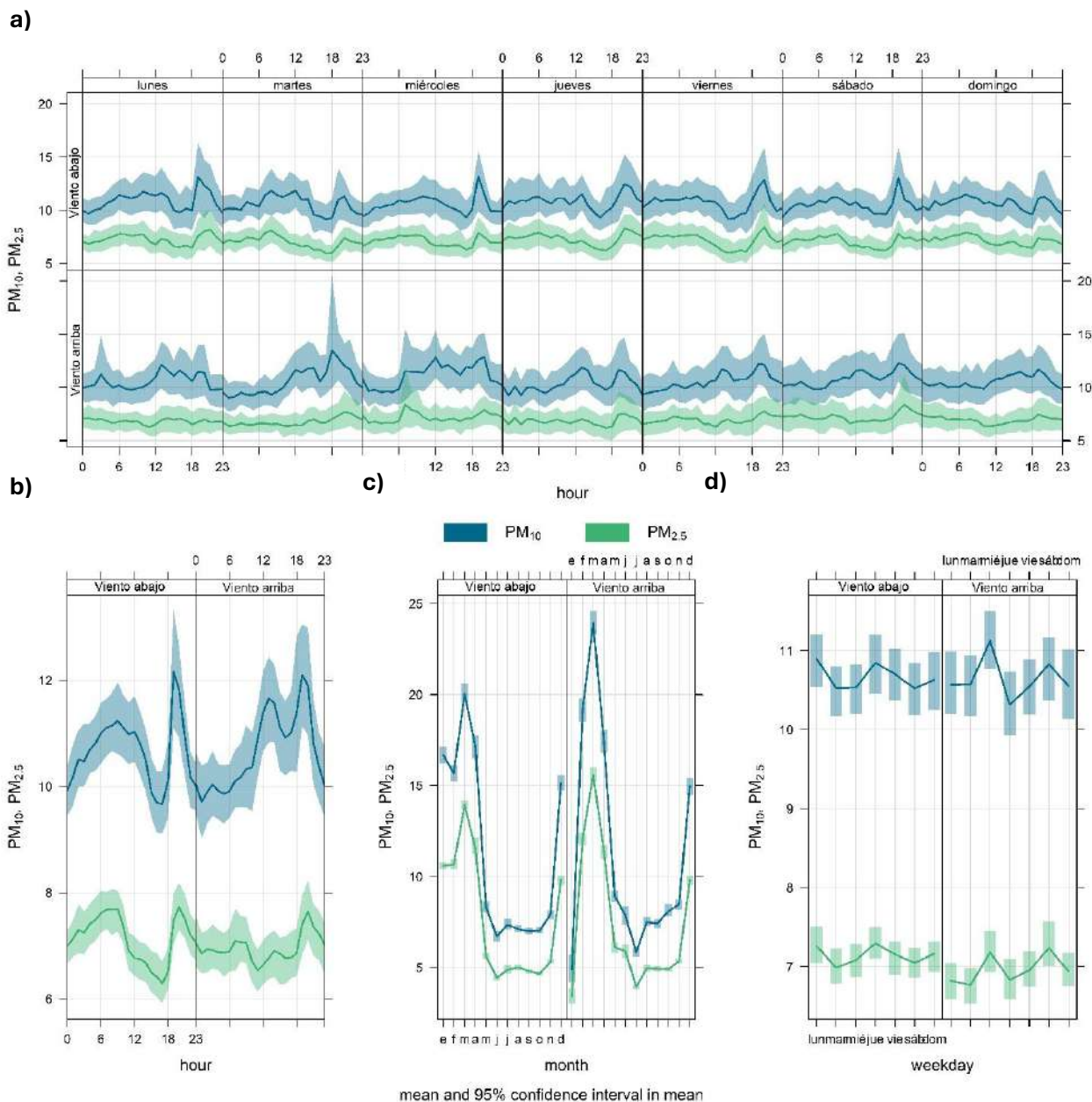


Figura 15. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre julio del 2022 a diciembre del 2024 – LAM4656

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

En cuanto a los ciclos temporales mensuales para los años 2023 y 2024, cuya información se detalla en el Anexo 6.2 del presente documento, se evidencian picos de concentración durante los meses de diciembre y enero, principalmente asociados a condiciones secas. En el comportamiento a sotavento se registraron concentraciones de PM₁₀ superiores a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de PM_{2.5} superiores a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 muestran una mayor variabilidad en 2024.

4.2.5 Análisis del Índice de Calidad del Aire – ICA

El análisis de los índices de Calidad de Aire ICA diarios de PM_{10} y $PM_{2.5}$, 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, se presenta a continuación. 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.
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 16, 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 2024, donde se evidencia claramente que la mayoría de los registros reflejaron un índice de la calidad del aire en categoría “Buena”, lo cual representa un riesgo para la salud pública mínimo o nulo.

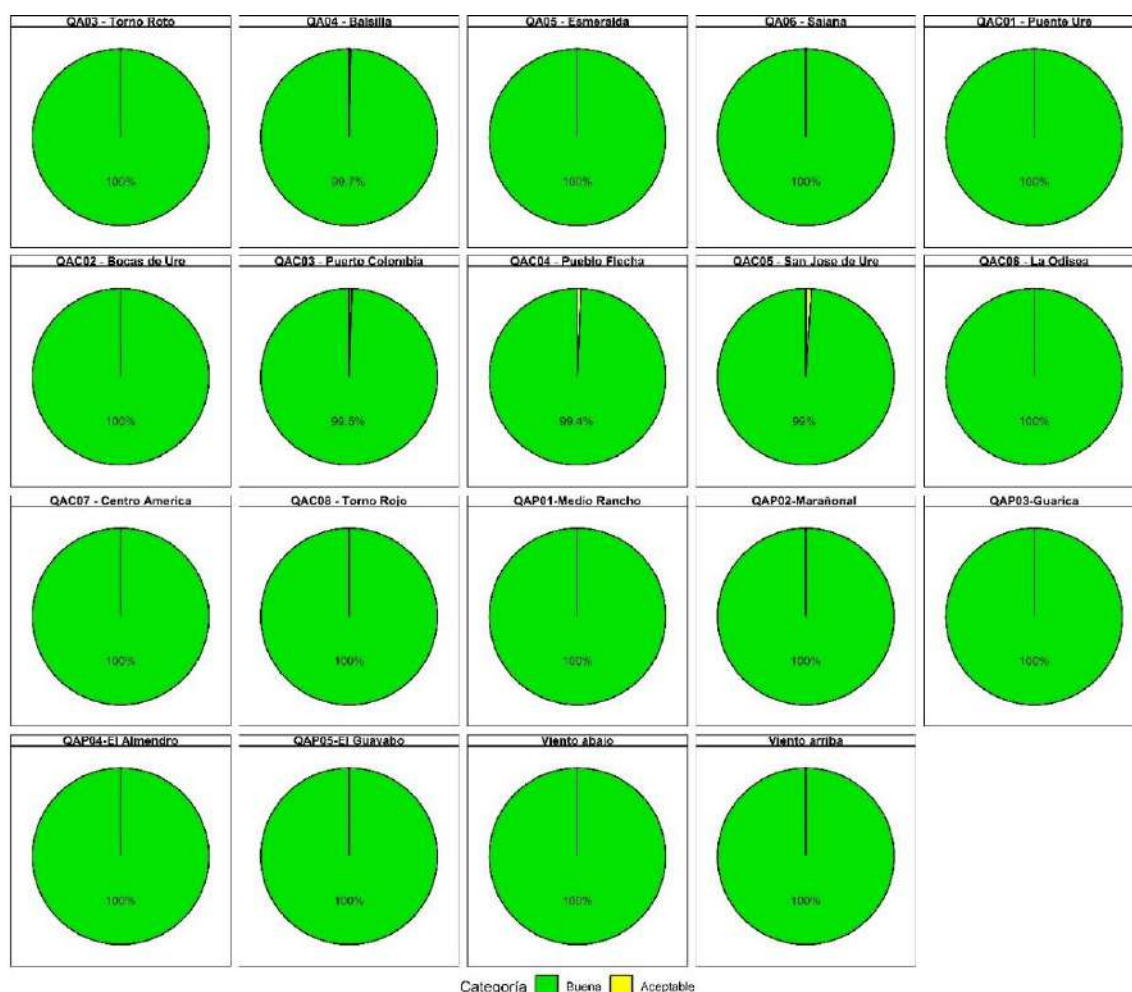


Figura 16. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{10}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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 17, presenta la distribución porcentual de las categorías ICA de $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo que hacen parte de la presente estrategia.

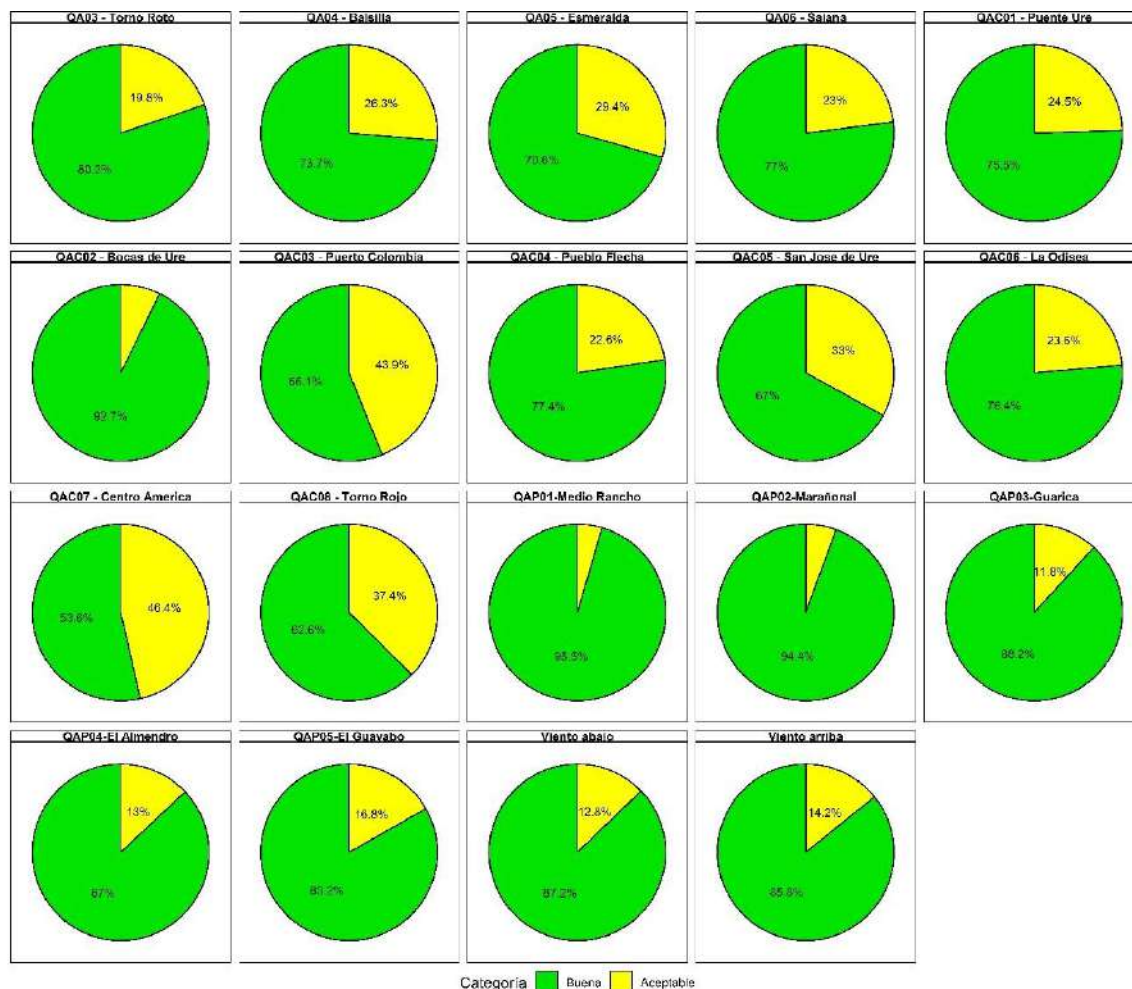


Figura 17. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5}

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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: QAP01 – Medio Rancho con 95.5% de los registros, QAP02 – Marañonal con 94.4 % y QAC02 – Bocas de Uré con 92.7 %. En lo relacionado con las estaciones en donde se determinó una mayor proporción del ICA en categoría “Aceptable”, se encuentran: QAC07 – Centro América con 46.4 %, QAC03 – Puerto Colombia con 43.9% y QAC08 – Torno Rojo con 37.4 %. Lo anterior indica una mayor exposición a concentraciones moderadas 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 2024

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

Fuente: ANLA – SIPTA, 2025 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 2021 a 2024. 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.

Sin embargo, se evidencian variaciones interanuales, especialmente en el expediente LAV0002-00-2020, que muestra fluctuaciones amplias en la proporción de la categoría “Buena” (por ejemplo, de 57.9 % a 100 % en 2021, y de 53.6 % a 92.7 % en 2024), lo cual indica una mayor sensibilidad de este proyecto a cambios en condiciones locales o meteorológicas. La categoría “Aceptable” se presenta de forma complementaria, con máximos del 46.4 %, mientras que la categoría “Dañina a grupos sensibles” aparece de forma esporádica y marginal, únicamente en el expediente LAV0052-00-2019 en 2023, con un 1.8 %.

Para el proyecto LAM4656 (central térmica), los resultados muestran una condición más estable, con rangos estrechos en la categoría “Buena” (87–91 %) y sin presencia de categorías dañinas, lo cual sugiere un impacto limitado del proyecto sobre los niveles de $PM_{2.5}$ en su área de influencia.





4.2.5.3 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 DISPERSION DE MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y PM_{2.5}

A partir de la información contenida en la Actualización del Reporte de Análisis Regional Río San Jorge y Afluentes Río Sinú, elaborado por la ANLA en 2024, así como de los datos reportados por las Sociedades en los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA), 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}. Este modelo integró registros de variables meteorológicas y emisiones atmosféricas provenientes de los ICA del año 2023, además de información relacionada con permisos de emisión, estudios isocinéticos y otros datos disponibles de proyectos que desarrollan actividades energéticas y mineras (ver Tabla 6).

De forma complementaria, se contempló la modelación de condiciones prospectivas a partir de las proyecciones climáticas futuras bajo el escenario SSP5-8.5, el cual representa una trayectoria de desarrollo intensivo basado en combustibles fósiles, caracterizado por emisiones muy altas.

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, 2025

El objetivo de la modelación atmosférica es determinar el impacto acumulativo en el componente atmosférico que podría presentarse en el área donde se implementa la estrategia de monitoreo del Alto San Jorge. Para ello, se integran las principales fuentes de emisión atmosférica asociadas a los POA's correspondientes al año 2023, para los cuales se cuenta con información disponible, en particular las actividades relacionadas con 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:

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





Para el desarrollo del modelo de dispersión de contaminantes en la zona del Alto San Jorge se empleó, el modelo Aermod recomendado por la EPA, se contempló información meteorológica WRF del expediente LAV0002-00-2020; 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: Soportes de modelación del expediente LAV0002 - Mina Cerromatoso.
 - Estudios isocinéticos: Fuentes fijas termoeléctrica LAM4656 - Gecelca.
 - Permiso de emisiones otorgado a LAV0052-00-2019 - Mina Queresas y Porvenir.
- Escenario de modelación:
 - Escenario Actual: Relacionado con las actividades desarrolladas en 2023 por los proyectos asociados a la estrategia de monitoreo.
 - Cambio climático: SSP5-8.5: Escenario de desarrollo intensivo basado en combustibles fósiles, con emisiones muy altas.

- 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 1.802 receptores, sin comprometer la distribución espacial ni la representatividad del conjunto original. De igual forma, se incluyeron las 19 estaciones de monitoreo del sistema de vigilancia permanente instaladas por las Sociedades que hacen parte de la Estrategia de Monitoreo Regional.

- Concentración de Fondo:

Considerando la dinámica del comportamiento del viento descrito en el capítulo 3.2.2 y la Actualización del Reporte de Análisis Regional Río San Jorge y Afluentes Río Sinú, se identifica que la estación MCA-LAV0002-00-2020-0004 representa la condición de fondo al estar ubicada en el sector noroccidente (NW) de la región y la determinación de la concentración de fondo





corresponde al percentil 50 o mediana de la serie temporal del 2021 al año 2024.

- Concentración de fondo PM_{10} : $13,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- Concentración de fondo $PM_{2.5}$: $5,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$

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

4.3.2 Resultados

Frente a los resultados de PM_{10} y $PM_{2.5}$, en la Tabla 8 se presentan las estadísticas descriptivas correspondientes a los puntos denominados como receptores sensibles, seleccionados conforme a la metodología definida en el numeral 3.3.1.

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

Contaminante	Escenario	Media	Mediana	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
PM10	Actual	15.54	15.27	25.83	15.06	0.79
PM2.5	Actual	8.93	8.897	10.515	8.836	0.122

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025

Producto de la modelación regional, los resultados muestran que las concentraciones anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los receptores sensibles presentan una distribución estable y de baja dispersión espacial, con promedios de $15.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Esta baja variabilidad se debe, en parte, al aporte significativo de la concentración de fondo considerada en el modelo ($13.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$), lo que indica una carga base relativamente uniforme en el territorio. Sin embargo, los valores máximos registrados ($25.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $10.515 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$) permiten identificar zonas de mayor sensibilidad ambiental, donde la interacción entre las emisiones locales y las condiciones de fondo se pueden llegar a presentar zonas en las cuales se aumenta el aporte en los niveles de inmisión generado por los proyectos.

En cuanto la comparación de los resultados de modelación de PM_{10} y $PM_{2.5}$ entre los resultados modelados y medidos a través del SCVCA se presenta la figura que se relaciona a continuación



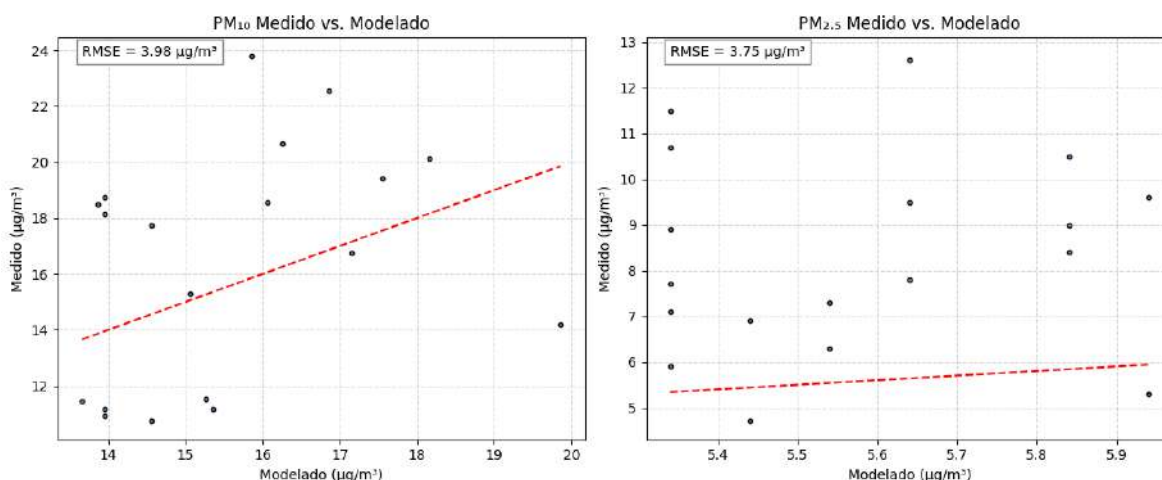


Figura 18. Comparación entre concentraciones modeladas y medidas de PM₁₀ y PM_{2.5} en receptores sensibles

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025

La Figura 18, que muestra la correlación entre las concentraciones medidas y modeladas de PM₁₀ y PM_{2.5}, en la cual se evidencia diferencias en el comportamiento del modelo frente a cada contaminante. En el caso de PM₁₀, se observa una tendencia a sobreestimar los valores bajos y subestimar los altos, lo que sugiere un efecto de suavizado típico de modelos regionales, donde la resolución espacial limita la representación de variaciones locales. Para PM_{2.5}, en cambio, se aprecia una subestimación sistemática, especialmente a partir de concentraciones superiores a 10 µg/m³, lo cual refleja una menor sensibilidad del modelo frente a fuentes específicas o condiciones meteorológicas puntuales que afectan el material particulado menor a 2.5 micras.

En ambos casos, los valores de RMSE obtenidos (3.98 µg/m³ para PM₁₀ y 3.75 µg/m³ para PM_{2.5}) indican discrepancias relevantes frente a los datos observados. No obstante, la implicación de este error es distinta para cada contaminante: en PM₁₀, el RMSE representa una variación moderada respecto al rango de concentraciones registradas, mientras que en PM_{2.5}, el mismo nivel de error tiene un peso proporcionalmente mayor, dada la menor magnitud de las concentraciones. Esto sugiere que el modelo muestra una menor capacidad para capturar la variabilidad real de PM_{2.5}, aunque las discrepancias observadas se mantienen dentro de los niveles de incertidumbre esperados para modelaciones regionales. En este sentido, si bien los resultados de modelación permiten identificar el aporte individualizado sobre los receptores sensibles y caracterizar patrones espaciales, estos deben interpretarse de manera complementaria con las mediciones reales. Por ello, se resalta la importancia de mantener y fortalecer los sistemas de monitoreo permanente como soporte esencial para la evaluación continua del impacto y la posible acumulación que pueda presentar por la operación de los proyectos asociados a la estrategia de monitoreo.

En ese orden de ideas, 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 19.

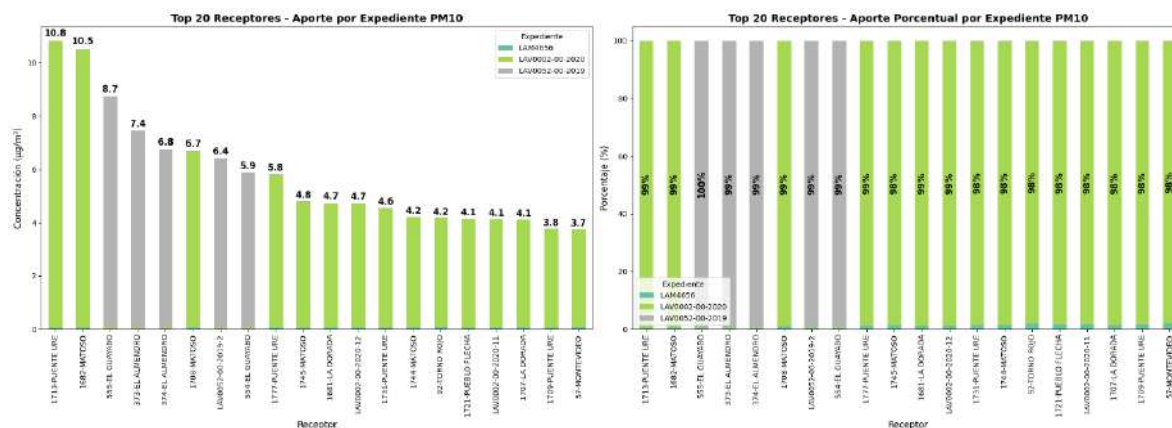


Figura 19. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM_{10} : Concentración ($\mu g/m^3$) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.

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, sin considerar 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 que superan el 95 % del total modelado. En particular, se destacan quince (15) puntos asociados al expediente LAV0002-00-2020 y cinco (5) al expediente LAV0052-00-2019.

Este patrón sugiere que, aunque se trata de una modelación regional, los impactos se encuentran espacialmente diferenciados y con baja superposición entre fuentes, lo que reduce la posibilidad de efectos acumulativos relevantes para PM_{10} en estos receptores. No obstante, la identificación de algunos puntos con contribuciones compartidas entre dos o más expedientes resalta la importancia de continuar con evaluaciones integradas que permitan anticipar posibles acumulaciones en escenarios futuros o bajo condiciones operativas cambiantes.

Los resultados obtenidos para $PM_{2.5}$ se relacionan en la figura que se relaciona a continuación.

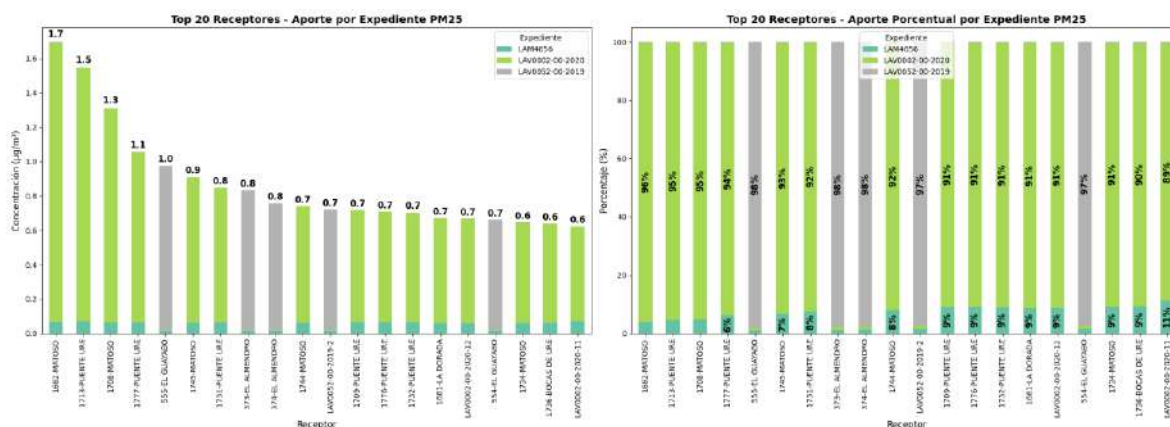


Figura 20. Top 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM_{2.5}: Concentración (µg/m³) y porcentaje de contribución, discriminados por expediente.

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025

La Figura 20 presenta los 20 receptores sensibles con mayor aporte de PM_{2.5}, evidenciando que, al igual que en el caso de PM₁₀, **no se identifican impactos acumulativos significativos**. En la mayoría de los casos, se observa una clara predominancia de un solo expediente, con contribuciones que oscilan entre el 89 % y el 99 % del aporte total por receptor.

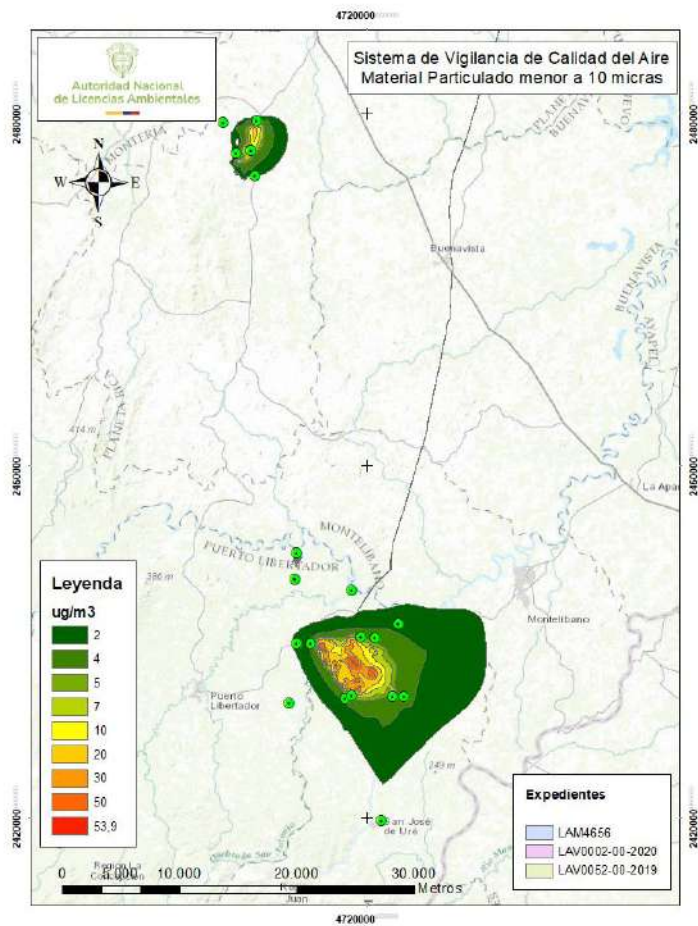
Este patrón indica que, aunque existen contribuciones de múltiples fuentes y/o proyectos en algunos puntos, las concentraciones están mayoritariamente determinadas por un único proyecto. Por ejemplo, en el receptor ubicado en la vereda Cerro Matoso, que presenta el mayor aporte individual sin considerar la concentración de fondo (1.7 µg/m³), indica que el 96 % corresponde al expediente LAV0002-00-2020 (Cerro Matoso). Esta situación refleja una baja interacción entre las emisiones de los distintos proyectos evaluados, lo que reduce la relevancia de los efectos acumulativos para PM_{2.5} en este grupo de receptores.

No obstante, la presencia de aportes concurrentes, aunque menores (entre el 3 % y el 11 %), sigue siendo relevante desde una perspectiva preventiva. Por ello, se destaca la importancia de mantener los sistemas de monitoreo permanente como herramienta clave para la evaluación continua y oportuna de la calidad del aire en la región.

En complemento, las isopletras obtenidas para los dos escenarios y los dos contaminantes se presentan en la Figura 21 y la Figura 22; estos resultados ilustran espacialmente lo analizado previamente, evidenciando que, debido a la distancia entre fuentes y a los procesos de dispersión atmosférica, no se espera una acumulación significativa de impactos asociados a los proyectos mineros y de generación de energía a partir de termoeléctricas. Asimismo, se advierte el cambio potencial que podría generarse bajo un escenario prospectivo de cambio climático, aunque manteniendo niveles de concentración similares a los actuales.



Isoplethas PM₁₀ – Promedio Anual
Escenario Línea Base



Isoplethas PM₁₀ – Promedio Anual
Escenario Cambio Climático

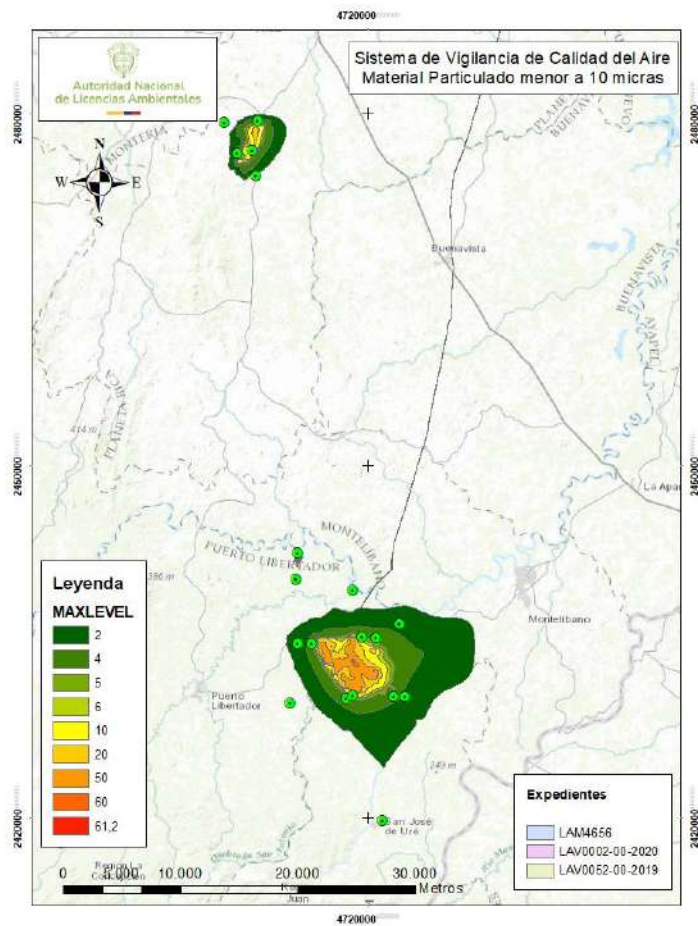
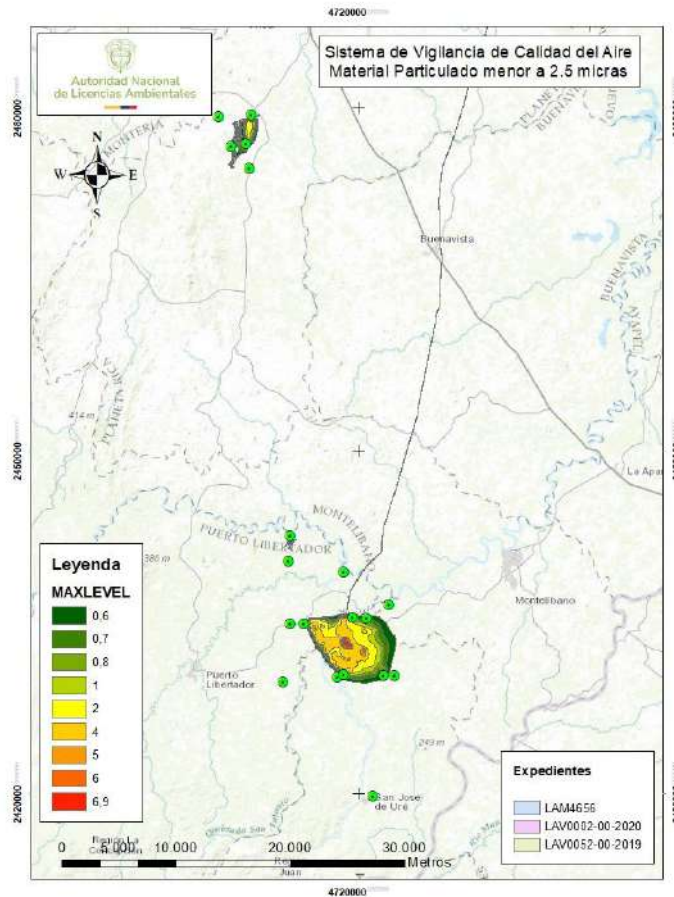


Figura 21. Isoplethas PM₁₀ - Tiempo de exposición anual

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025



Isoplethas PM_{2.5} – Promedio Anual
Escenario Línea Base



Isoplethas PM_{2.5} – Promedio Anual
Escenario Cambio Climático

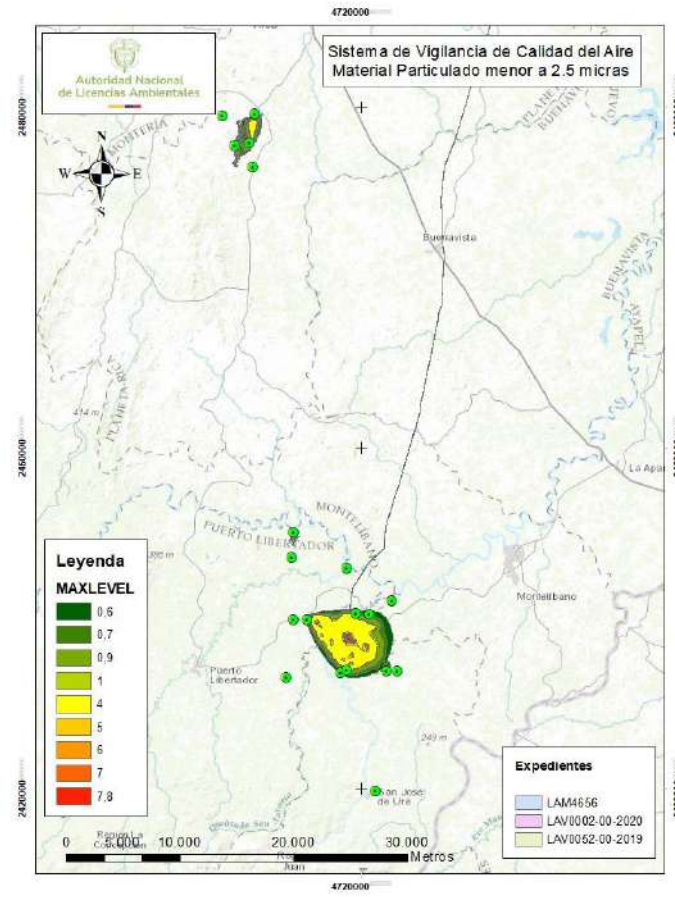


Figura 22. Isoplethas PM_{2.5} - Tiempo de exposición anual

Fuente: ANLA - SIPTA, 2025

De igual forma, en cuanto a la comparación de escenarios, las figuras previamente mencionadas permiten evidenciar que, a nivel espacial, no se observan cambios que puedan considerarse significativos entre el escenario actual y el escenario con condiciones meteorológicas asociadas al cambio climático. No obstante, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los receptores sensibles, se realizó un análisis estadístico de los niveles de inmisión para un tiempo de exposición anual, con el fin de evaluar si lo observado espacialmente se refleja en diferencias cuantificables.

Inicialmente se descartó la normalidad de los datos, por lo que se optó por aplicar el test no paramétrico de Wilcoxon pareado. La hipótesis nula (H_0) del test establece que no existen diferencias entre los escenarios base y de cambio climático, es decir, que cualquier variación es atribuible al azar. Sin embargo, los resultados del test arrojaron un valor de p igual a 0 para ambos contaminantes (PM_{10} y $PM_{2.5}$), lo que permite rechazar la hipótesis nula y confirmar la existencia de diferencias estadísticamente significativas.

A pesar de ello, dichas diferencias no se traducen en cambios relevantes desde el punto de vista ambiental. Las medias y medianas para ambos contaminantes muestran variaciones inferiores a $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre los escenarios, lo cual resulta marginal frente a los umbrales de evaluación. En términos de efecto, el cálculo del estadístico Cliff's Delta respalda esta interpretación: para PM_{10} se obtuvo un valor de -0.624 , lo que indica un efecto moderado a fuerte, pero con dirección negativa (el escenario base presenta valores ligeramente menores); en cambio, para $PM_{2.5}$ el valor fue de 0.210 , reflejando un efecto leve.

En conjunto, estos resultados sugieren que, aunque el modelo proyecta una diferencia sistemática entre los escenarios, esta no implica una alteración sustancial en la calidad del aire, al menos bajo los supuestos y condiciones evaluadas para los contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$.

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 $PM_{2.5}$ 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 2020 y diciembre del 2024, 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 estos corresponden a explotación minera, a cargo de Cerro Matoso S. A., y uno es termoeléctrico, operado por Gecelca S.A. Los SVCA de estos proyectos emplean estaciones con tecnología automática y manual, que recopilan datos de forma continua o cada tres días, respectivamente, para los parámetros PM_{10} y $PM_{2.5}$. El periodo de análisis de los datos reportados por estos sistemas abarca los años 2020 a 2024, con variaciones según las condiciones de cada proyecto.
- La representatividad de los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los años recientes ha aumentado en la mayoría de las estaciones de monitoreo que hacen parte de la presente estrategia. Es importante siempre garantizar que estos registros cumplan con el criterio de representatividad superior al 75 %. Cabe señalar que, durante el año 2024, las estaciones Esmeralda (LAV0002-00-2020-0002) y Puerto Colombia (LAV0002-00-2020-0005) presentaron bloqueos por parte de las comunidades que impidieron obtener la representatividad mínima de muestro.
- En términos de promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$, se observa en una tendencia general de cumplimiento, tomando como referencia los niveles máximos permisibles establecidos en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Respecto a las tendencias de los promedios diarios, a nivel general para ambos tipos de material particulado analizado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), se identificó que los datos de percentil 50 se encuentran en cumplimiento normativo del límite máximo permisible correspondiente, establecido por la Resolución 2254 de 2017. No obstante, se registran excedencias diarias aisladas y consideradas valores atípicos según la distribución de los datos, en las estaciones Torno Roto (LAV0002-00-2020-0011), Puerto Colombia (LAV0002-00-2020-0005), Centro América (LAV0002-00-2020-0007) y Marañonal (LAV0052-00-2019-0002). Ante esa situación, es importante que, en los procesos de seguimiento y control ambiental, se analicen las condiciones meteorológicas desfavorables o verificar posibles eventos puntuales de las fuentes de emisión, como quemas no autorizadas en cercanías de estas estaciones, para así reforzar las medidas de manejo y reducir la emisión de material particulado $PM_{2.5}$ en caso de ser necesario.
- 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 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 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 PM_{10} 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 PM_{10} 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, dado 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 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. Esto resalta la influencia de las condiciones meteorológicas sobre la calidad del aire y la necesidad de intensificar las estrategias de control diferenciadas según la temporada y las actividades de cada proyecto.
- 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.

- Las concentraciones anuales modeladas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en los receptores sensibles presentan una baja dispersión espacial, con valores promedio de $15.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $8.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Los valores extremos se ubicaron entre 15.06 y $25.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , y entre 8.836 y $10.515 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Estos valores son significativamente inferiores al límite anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectiva, siendo además coherentes con los resultados obtenidos en el SVCA de la estrategia de monitoreo.
- Los resultados en los receptores para los dos contaminantes presentaron relativa homogeneidad la cual está influenciada por el uso de una concentración de fondo uniforme en la modelación ($13.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$), lo que indica una carga base constante que limita la expresión de variaciones locales más acentuadas.
- El análisis comparativo entre el escenario base y el escenario de cambio climático mostró diferencias estadísticamente significativas, pero no ambientalmente relevantes. Las diferencias en media y mediana son inferiores a $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, los valores de Cliff's Delta (-0.624 para PM_{10} y 0.210 para $PM_{2.5}$) sugieren un efecto moderado a leve, sin implicaciones críticas sobre la calidad del aire proyectada.
- Los aportes provenientes de fuentes térmicas son notablemente inferiores frente a los asociados a la actividad minera, destacando que el proyecto “Cerro Matoso” concentra los mayores aportes modelados.
- No se evidencian **impactos acumulativos significativos** en los receptores analizados tanto para PM_{10} como $PM_{2.5}$. En todos los casos evaluados, un único proyecto es responsable de más del 95 % del aporte modelado, indicando baja superposición espacial de emisiones entre proyectos, por tanto, no se observa una interacción significativa entre las plumas de dispersión de los proyectos, obras y/o actividades bajo la jurisdicción de la ANLA.
- La dispersión se comporta de manera localizada y los aportes no se superponen en el espacio ni en magnitud. En particular, las emisiones de la Central Térmica GECELCA (calderas 3 y 3.2) presentan contribuciones mínimas en comparación con el aporte modelado de los proyectos mineros de Cerromatoso S.A., el cual se constituye como la fuente de mayor impacto relativo sobre los receptores evaluados.
- Para el proyecto Central Térmica Gecelca (LAM4656), se recomienda revisar en el programa de manejo y/o seguimiento ambiental si existe la obligación de presentar una actualización del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. En caso afirmativo, se sugiere solicitar la inclusión de fuentes adicionales a las fuentes fijas ya contempladas, tales como las pilas de almacenamiento y demás fuentes identificadas a partir del inventario de emisiones que se levante en la zona de influencia.

- Para el proyecto Queresas y Porvenir (LAV0052-00-2019), se recomienda actualizar el modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, incorporando no solo las fuentes objeto del permiso actual, sino también todas las actividades que puedan generar impactos sobre la calidad del aire. Esta actualización debe permitir una mejor caracterización del comportamiento de los niveles de inmisión en el área del proyecto y asegurar su coherencia con el avance de las actividades mineras proyectadas. Si bien la modelación permite individualizar las fuentes por tipo de proyecto, se resalta la necesidad de mantener los sistemas de monitoreo permanente, dado que los resultados modelados deben ser interpretados de forma complementaria a los datos medidos.

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

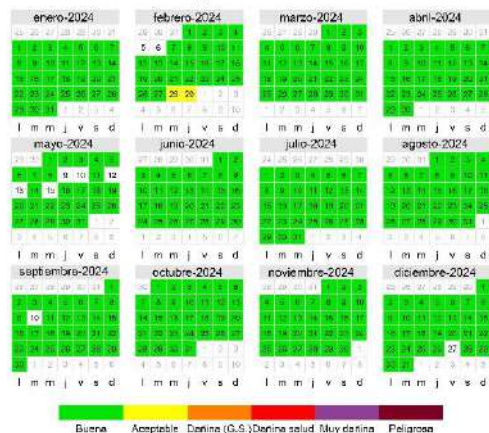
7.1.1 Expediente: LAV0002-00-2020



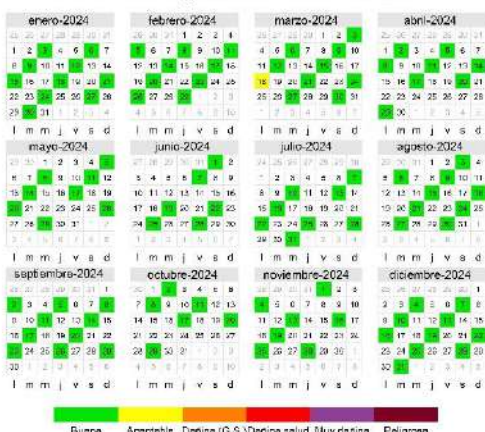
Cerro Matoso PM₁₀ QAC03 - Puerto Colombia 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC04 - Pueblo Flecha 2024



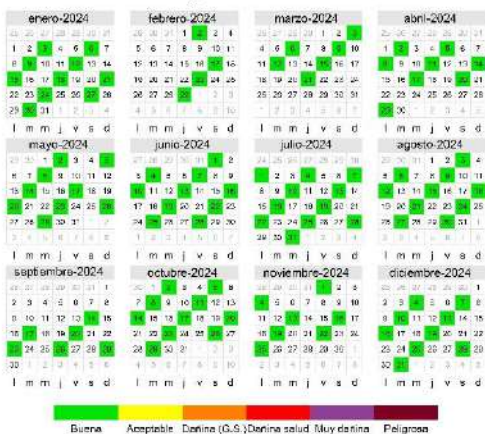
Cerro Matoso PM₁₀ QAC05 - San Jose de Ure 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC06 - La Odisea 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC07 - Centro America 2024



Cerro Matoso PM₁₀ QAC08 - Tomo Rojo 2024

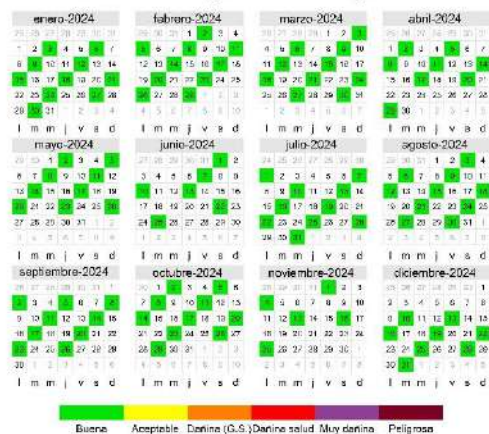
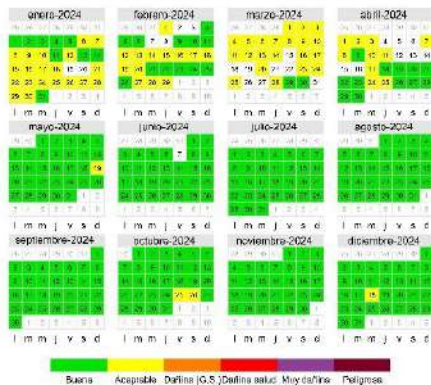


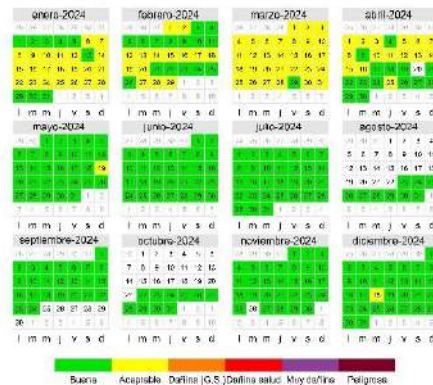
Figura 23. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM₁₀ - LAV0002-00-2020

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

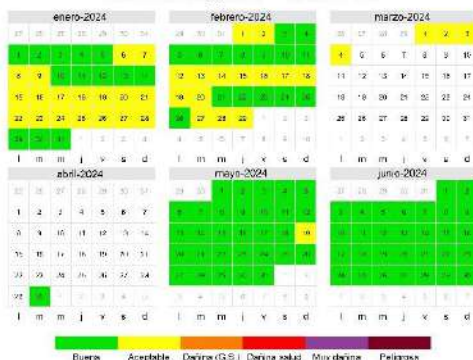
Cerro Matoso PM_{2.5} QA03 - Torno Roto 2024



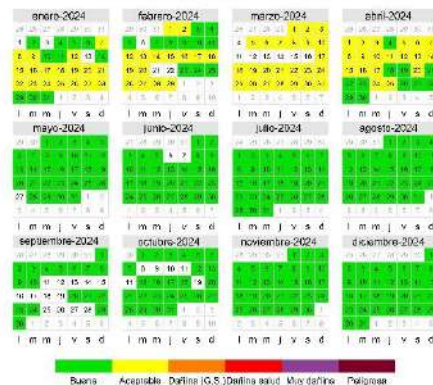
Cerro Matoso PM_{2.5} QA04 - Balsilla 2024



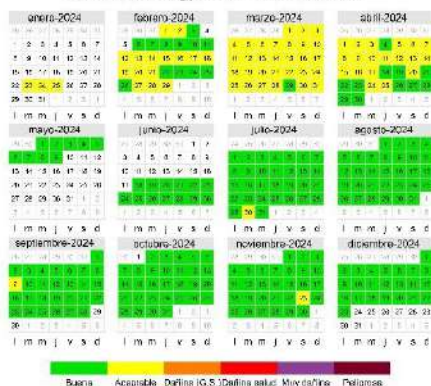
Cerro Matoso PM_{2.5} QA05 - Esmeralda 2024



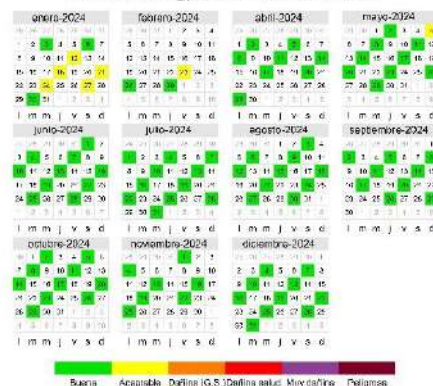
Cerro Matoso PM_{2.5} QA06 - Sajana 2024



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



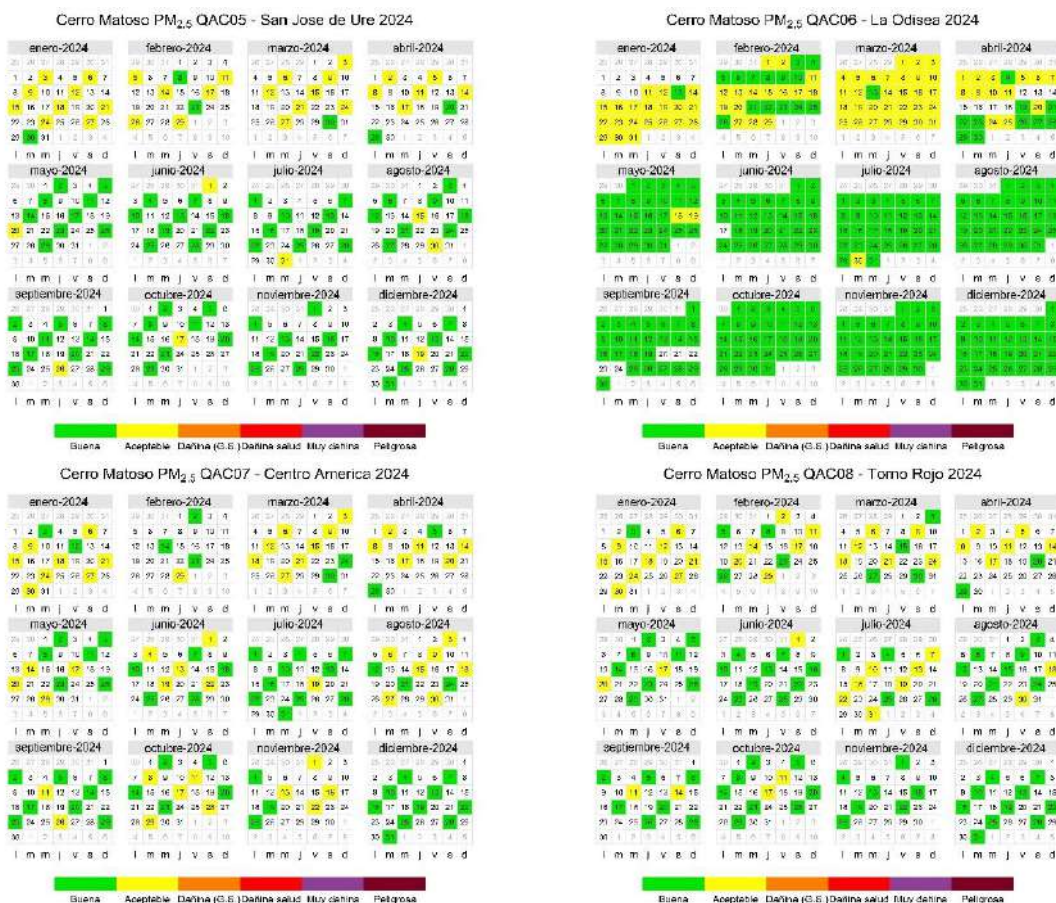
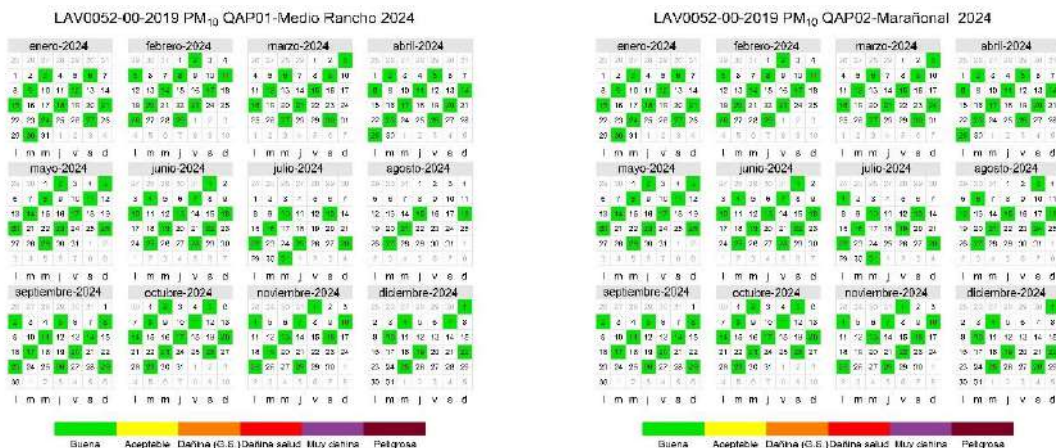
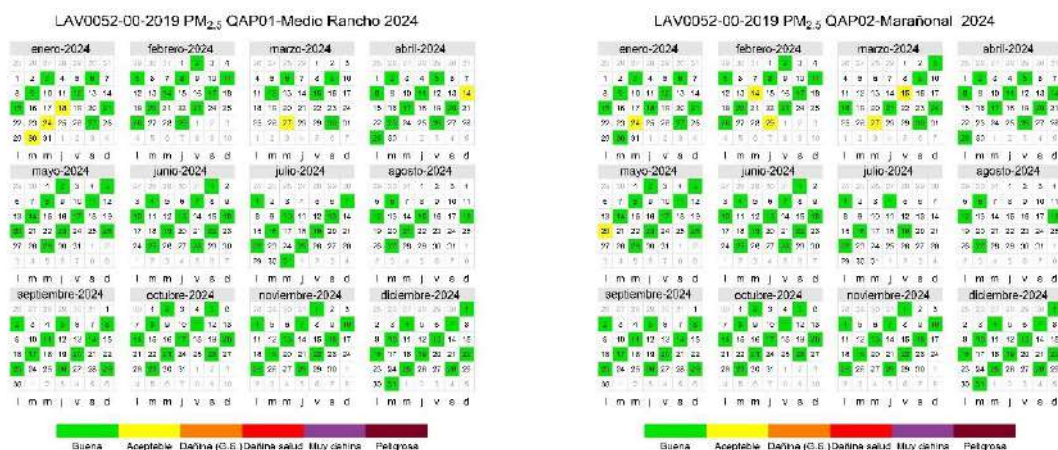
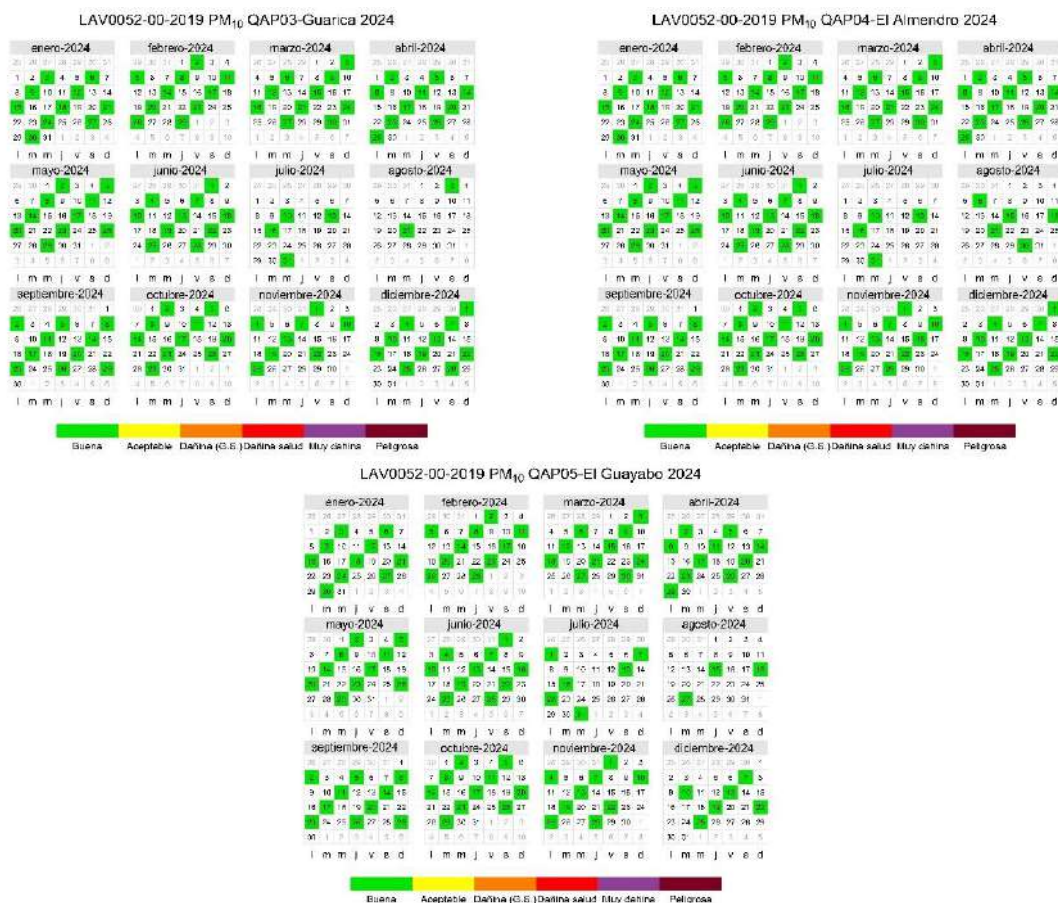


Figura 24. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5} - LAV0002-00-2020

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

7.1.2 Expediente: LAV0052-00-2019





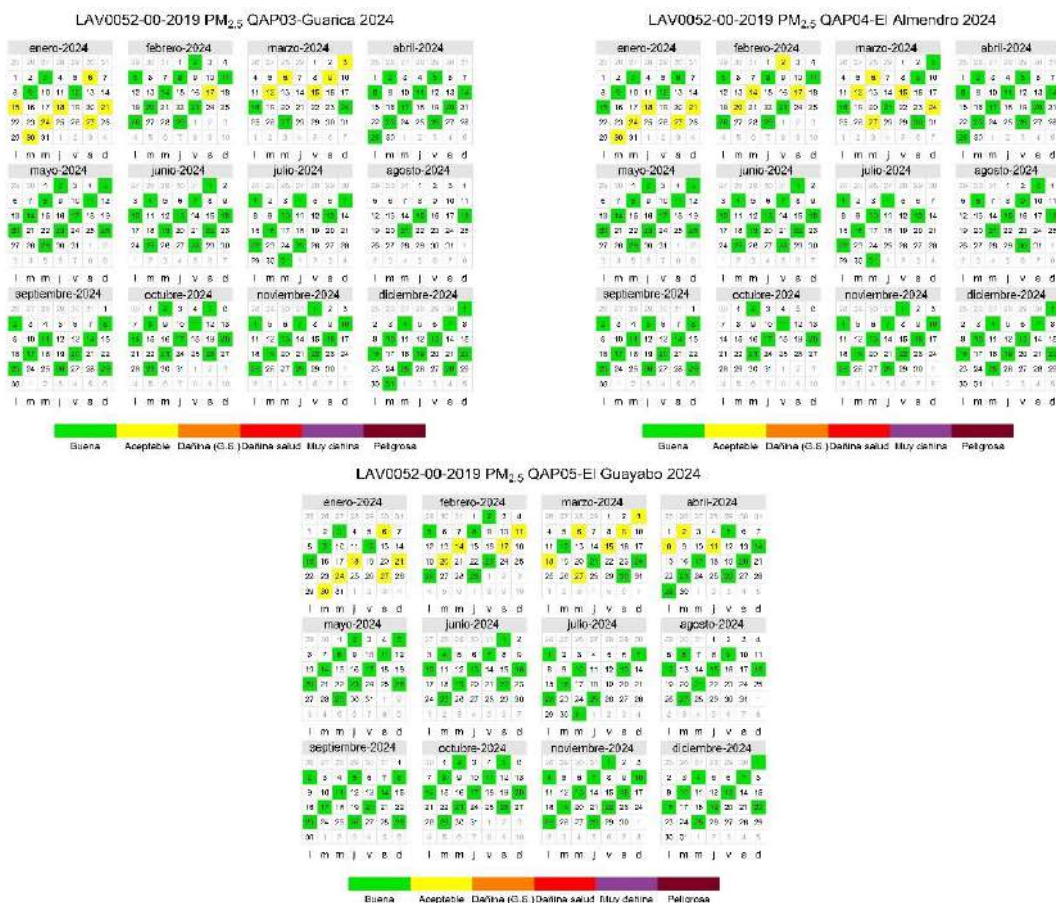


Figura 26. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM_{2.5} - LAV0052-00-2019

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

7.1.3 Expediente: LAM4656

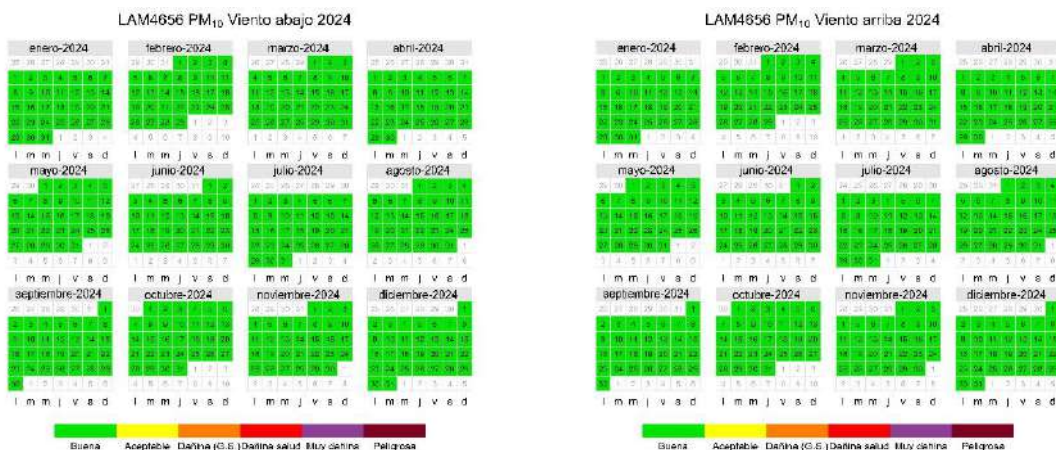
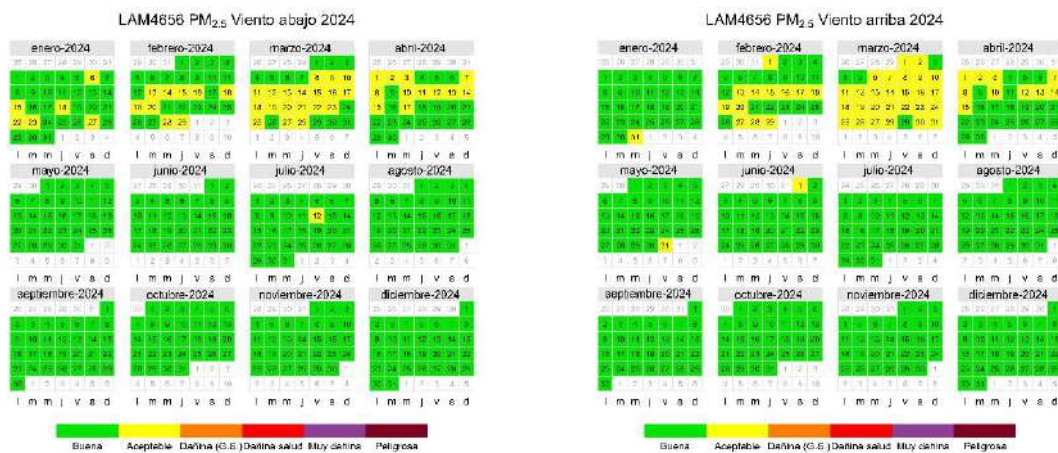


Figura 27. Índices de calidad del aire de 2024 ICA PM₁₀ - LAM4656

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



7.2 ANALISIS CICLOS TEMPORALES – LAM4656

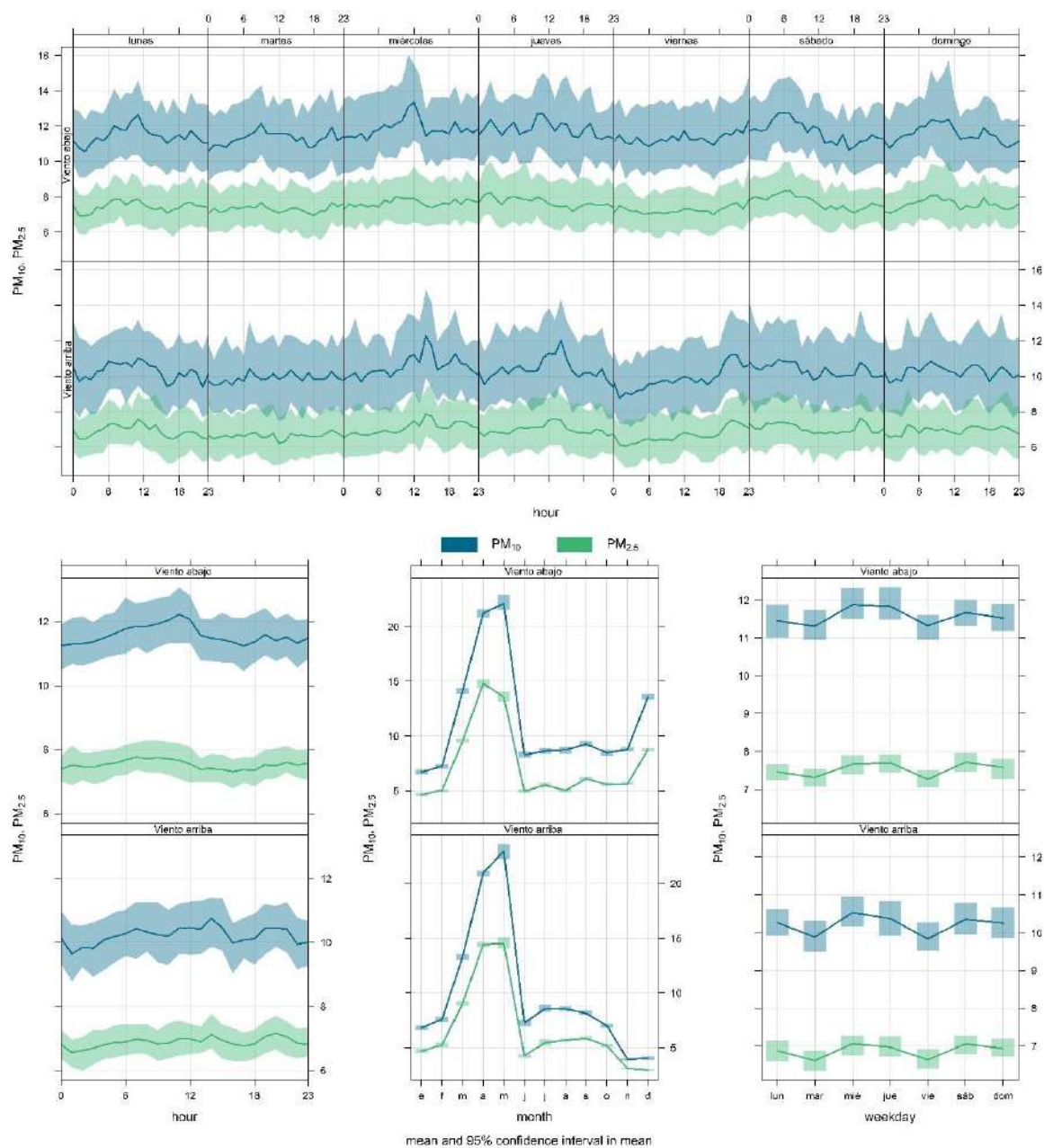


Figura 29. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2023

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

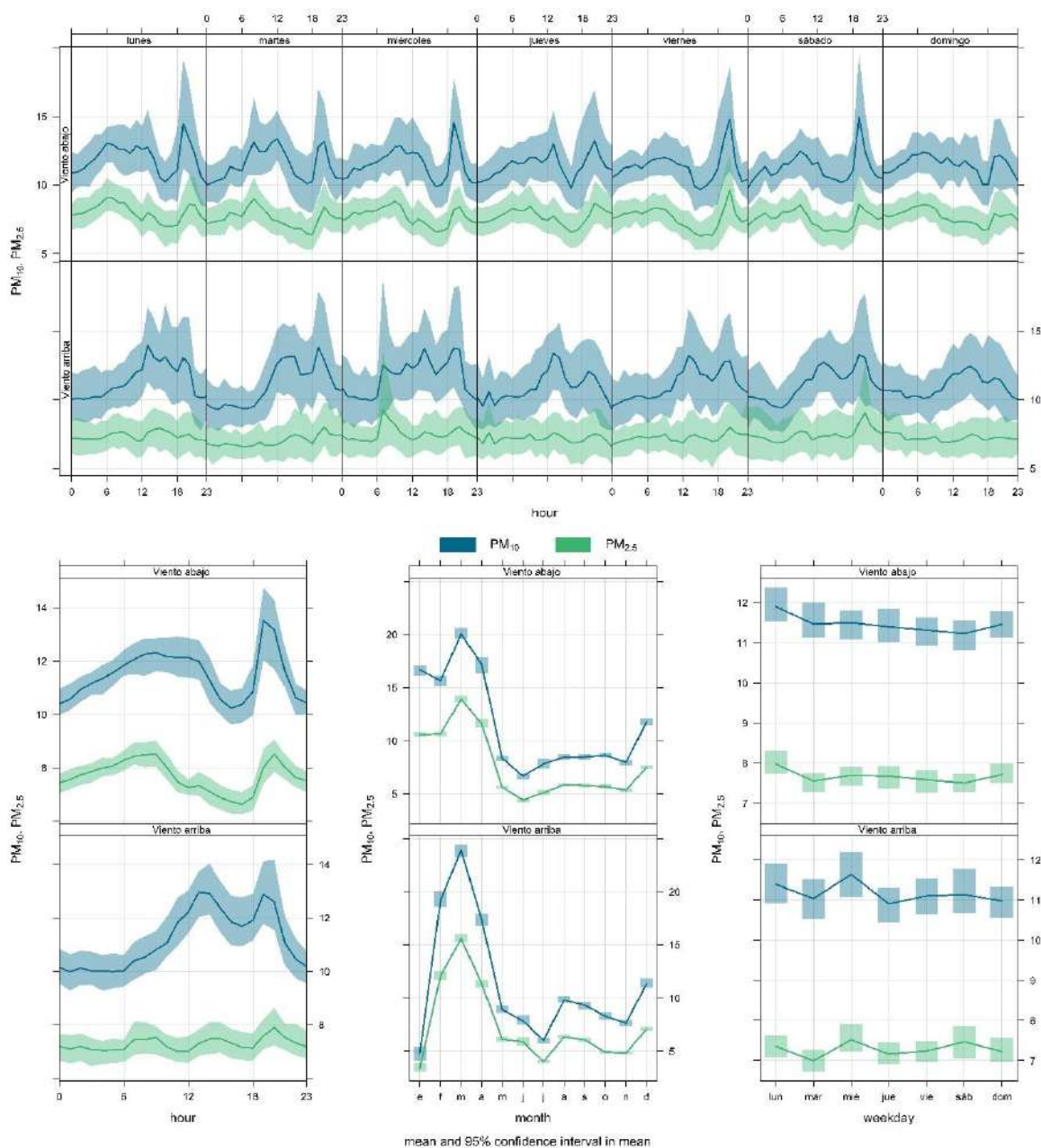


Figura 30. Tendencias temporales de las estaciones de calidad del aire entre enero y diciembre del 2024

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