

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA- FACULTAD DE CIENCIAS
MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE**



“Propuesta de monitoreo online de MP_{2,5} en la ciudad de Constitución como herramienta para la gestión ambiental y la salud pública”

YASNA KARINA FREIRE REYES

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN MEDIO AMBIENTE**

Director	: Dr. Eduardo Espinosa N.
Profesor	
Informante Interno	: Dr. Muhammad Nisar.
Profesor	
Informante Externo	: Dr. Hugo Garcés H.
	(UdeC)

Concepción, enero de 2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la perseverancia y la serenidad necesarias para afrontar cada etapa de este proceso académico.

A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y por acompañarme siempre en los desafíos que me propongo.

Y de manera muy especial, a mi compañero de vida, Felipe, por su amor, paciencia y apoyo inquebrantable, por creer en mí incluso en los momentos de mayor dificultad y por caminar a mi lado en cada uno de mis sueños y metas.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por guiarme durante este proceso, darme la fuerza para perseverar y la claridad necesaria para culminar esta etapa tan significativa de mi formación profesional y personal.

A mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional, su confianza y su constante motivación a lo largo de toda mi vida académica. A mi hermana y a mis sobrinas, por su cariño, comprensión y ser una fuente permanente de alegría e inspiración, incluso en los momentos de mayor exigencia.

A mi amor, Felipe, por su compañía constante, su paciencia infinita y su apoyo incondicional durante todo el desarrollo de este Magíster. Gracias por estar presente en cada etapa, por sostenerme en los momentos difíciles y por celebrar conmigo cada avance.

A mi profesor guía de tesis, el Dr. Eduardo Espinosa, por su disposición, orientación académica y valiosos aportes, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y fortalecimiento de esta investigación. Su experiencia y compromiso contribuyeron significativamente a la calidad y la coherencia de este trabajo.

Finalmente, agradezco a los encargados del Magíster en Medio Ambiente, así como a todos los docentes y al equipo académico-administrativo del programa, por la formación brindada, el apoyo brindado y la dedicación demostrada a lo largo de este proceso, los cuales fueron esenciales para alcanzar satisfactoriamente este importante logro académico.

Resumen

La calidad del aire en las ciudades de la zona centro-sur de Chile constituye un desafío creciente, particularmente en territorios donde predomina y no está certificada, y las condiciones geográficas favorecen la acumulación de contaminantes atmosféricos. La ciudad de Constitución, en la Región del Maule, presenta características ambientales y socioeconómicas que sugieren un riesgo relevante de exposición a material particulado fino ($PM_{2,5}$). Sin embargo, la comuna no cuenta con sistemas de monitoreo ni con datos oficiales que permitan evaluar la magnitud real del problema, lo que limita la capacidad institucional para diseñar estrategias preventivas y proteger la salud de la población.

El presente trabajo se desarrolla en este contexto de ausencia de información local, con el objetivo de comprender los factores que podrían influir en la generación y concentración de $PM_{2,5}$ en Constitución. Para ello, se analizan antecedentes nacionales e internacionales sobre la contaminación por leña, episodios críticos, impactos en la salud y experiencias de monitoreo en territorios de características similares. Paralelamente, se incorpora un diagnóstico territorial que considera elementos climáticos, geográficos, urbanos y socioambientales que permiten caracterizar las condiciones potenciales de riesgo en la ciudad.

A partir de la revisión teórica y del análisis del territorio, se evaluó la pertinencia de incorporar en el futuro estaciones de monitoreo de bajo costo como herramienta inicial para establecer una línea base de calidad del aire. En este marco, se definen criterios técnicos y territoriales para orientar la selección de zonas prioritarias de emplazamiento, tales como densidad residencial, uso de leña, presencia de fuentes emisoras, patrones de ventilación local, vulnerabilidad social y accesibilidad. La propuesta no contempla costos ni especificaciones de instalación, sino que se orienta a entregar una fundamentación técnica y espacial que permita, en etapas posteriores, avanzar hacia la implementación de sistemas de vigilancia atmosférica.

Los resultados evidencian una brecha crítica de información que dificulta la evaluación de los riesgos sanitarios asociados al $PM_{2,5}$ en la ciudad de Constitución. Asimismo, se identifican sectores del territorio donde la interacción entre condiciones sociales, ambientales y habitacionales podría favorecer una mayor exposición, lo que subraya la necesidad de contar con instrumentos de monitoreo a corto y mediano plazo.

En conclusión, la presente investigación constituye un aporte inicial para la futura construcción de una línea base de calidad del aire en la ciudad de Constitución. La definición de criterios de localización y el diagnóstico territorial realizado permiten orientar decisiones municipales y regionales en torno a la instalación de estaciones de medición, contribuyendo al fortalecimiento de la gestión ambiental y a la prevención de riesgos sanitarios asociados a la contaminación por $PM_{2,5}$.

Abstract

Air quality in the cities of south-central Chile presents a growing challenge, particularly in areas where air quality is prevalent but not certified, and where geographical conditions favor the accumulation of air pollutants. The city of Constitución, in the Maule Region, exhibits environmental and socioeconomic characteristics that suggest a significant risk of exposure to fine particulate matter (PM_{2,5}). However, the municipality lacks monitoring systems and official data to assess the true extent of the problem, limiting its institutional capacity to design preventative strategies and protect public health.

This study is conducted within this context of a lack of local information, aiming to understand the factors that could influence the generation and concentration of PM_{2,5} in Constitución. To this end, national and international data on wood pollution, critical episodes, health impacts, and monitoring experiences in areas with similar characteristics are analyzed. Simultaneously, a territorial diagnosis is incorporated, considering climatic, geographical, urban, and socio-environmental elements to characterize the potential risk conditions in the city.

Based on a theoretical review and territorial analysis, the feasibility of incorporating low-cost monitoring stations in the future was evaluated as an initial tool for establishing an air quality baseline. Within this framework, technical and territorial criteria were defined to guide the selection of priority locations, such as residential density, firewood use, presence of emission sources, local ventilation patterns, social vulnerability, and accessibility. The proposal does not include installation costs or specifications; rather, it aims to provide a technical and spatial foundation that will allow, in subsequent stages, progress toward the implementation of atmospheric monitoring systems.

The results reveal a critical information gap that hinders the assessment of health risks associated with PM_{2,5} in the city of Constitución. Furthermore, areas of the territory were identified where the interaction between social, environmental, and housing conditions could favor greater exposure, underscoring the need for monitoring instruments in the short and medium term.

In conclusion, this research constitutes an initial contribution to the future development of an air quality baseline for the city of Constitución. The definition of location criteria and the territorial diagnosis carried out will guide municipal and regional decisions regarding the installation of monitoring stations, contributing to the strengthening of environmental management and the prevention of health risks associated with PM_{2,5} pollution.

Índice de Contenidos

1. Introducción.....	3
1.1 Contexto global de la contaminación atmosférica por PM _{2,5}	6
2. Antecedentes	9
2.1 Relación del problema ambiental con la sociedad.....	9
2.2 Impactos ambientales identificados asociados al PM _{2,5}	12
2.3 Normativa nacional e internacional relacionada con el problema ambiental	15
2.3.1 Normativa nacional vigente	15
2.3.2 Normativa y compromisos internacionales	16
3. Objetivos de la investigación	18
3.1 Objetivo general	18
3.2 Objetivos específicos	18
4. Metodología.....	19
4.1 Fase 1: Análisis documental y sistematización de información secundaria.....	19
4.2 Fase 2: Análisis espacial y diagnóstico territorial de fuentes emisoras	20
4.2.1 Determinación de ponderaciones mediante el método AHP	21
4.3 Fase 3: Diseño conceptual de red de monitoreo	22
5. Resultados.....	24
5.1 Resultados del estado del arte y revisión normativa	24
5.1.1 Evidencia científica que fundamenta la necesidad de un sistema de monitoreo de PM _{2,5} en la ciudad de Constitución	24
5.1.2 Impactos en salud asociados a la exposición prolongada a PM _{2,5}	25
5.1.3 Estudios sobre emisiones de PM _{2,5} derivadas de la quema de leña	26
5.1.4 Emisiones industriales asociadas a la celulosa y papel.....	27
5.1.5 Emisiones vehiculares y su contribución al PM _{2,5} urbano	28
5.2 Resultados del catastro territorial y diagnóstico espacial.....	30
5.2.1 Zonificación física y condiciones territoriales	30
5.2.2 Caracterización habitacional según Censo 2024	31
5.2.3 Identificación de fuentes emisoras: evidencia visual	32
5.2.4 Distribución socioambiental del riesgo.....	33
5.2.5 Tendencia de urgencias respiratorias (2019–2025).....	33

5.2.6 Desagregación de causas respiratorias atendidas en urgencias en la ciudad de Constitución.	35
5.2.7 Comportamiento estacional de las atenciones respiratorias en la ciudad de Constitución (2019–2025)	37
5.2.8 Identificación de fuentes emisoras episódicas: incendios forestales	39
5.2.8.1 Evento reciente de incendio urbano-forestal ocurrido durante el año 2025	41
5.3 Resultados del modelo multicriterio y propuesta de red de monitoreo	42
5.3.1 Definición de aptitud ambiental para el monitoreo de $MP_{2,5}$	42
5.3.2 Modelo multicriterio y análisis de aptitud ambiental mediante SIG	42
5.3.3 Propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo	46
5.3.4 Validación preliminar con actores locales	49
5.3.5 Diseño conceptual de la red propuesta	51
6. Necesidades para la implementación de medidas	52
6.1 Infraestructura tecnológica necesaria	52
6.1.1 Estimación referencial de inversión para la red propuesta	52
6.2 Condiciones territoriales y logísticas	54
6.3 Requisitos normativos y administrativos	54
6.4 Capacidades de gestión, operación y mantenimiento	54
6.5 Gobernanza local y articulación institucional	55
6.6 Aceptabilidad social y participación comunitaria	55
6.7 Condiciones contextuales del territorio	55
7. Discusión	56
7.1 Aporte de la propuesta frente a modelos existentes	56
7.2 Brechas identificadas en la gestión actual	57
7.3 Comparación con experiencias internacionales	57
7.4 Valor agregado del modelo multicriterio basado en Combinación Lineal Ponderada (WLC)	58
7.5 Riesgos y limitaciones de la propuesta	58
7.6 Tendencias futuras relevantes	58
7.7 Contribución del proyecto a la gestión ambiental de Constitución	58
8. Conclusiones y recomendaciones	60
9. Referencias bibliográficas	63

Índice de Tablas

Tabla I. Comparación internacional de normas de calidad del aire para PM _{2,5}	16
Tabla II. Matriz de comparación por pares aplicada mediante el método AHP	21
Tabla III. Síntesis de resultados del estado del arte y normativa aplicable	24
Tabla IV. Evidencia científica nacional e internacional sobre los efectos en salud asociados a la exposición prolongada a PM _{2,5}	25
Tabla V. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y efectos derivados de la quema de leña.....	26
Tabla VI. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y emisiones de PM _{2,5} asociadas a la industria de la celulosa y papel	27
Tabla VII. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y emisiones de PM _{2,5} asociadas a fuentes móviles	29
Tabla VIII. Variables espaciales utilizadas en el diagnóstico territorial.....	30
Tabla IX. Catastro de fuentes emisoras según evidencia visual georreferenciada	32
Tabla X. Distribución socioambiental del riesgo	33
Tabla XI. Tendencia anual de urgencias totales y respiratorias en la Región del Maule (2019–2025)	34
Tabla XII. Causas respiratorias atendidas en los centros de urgencia de la comuna de Constitución (2019–2025).....	36
Tabla XIII. Atenciones respiratorias mensuales registradas en los centros de urgencia de la ciudad de Constitución (2019–2025)	37
Tabla XIV. Ocurrencia de incendios forestales y superficie total afectada identificadas en el catastro de fuentes emisoras episódicas de la ciudad de Constitución (2014–2024)	39
Tabla XV. Ponderaciones de criterios obtenidas mediante el método AHP	43
Tabla XVI. Indicadores de consistencia del método AHP	43
Tabla XVII. Clasificación tipo semáforo de la propensión territorial a la acumulación de MP _{2,5} en la ciudad de Constitución	45
Tabla XVIII. Propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo de MP _{2,5} según aptitud ambiental y propensión territorial.....	48
Tabla XIX. Actores consultados en la validación preliminar de la propuesta	50
Tabla XX. Especificaciones técnicas del sistema propuesto.....	51
Tabla XXI. Estimación referencial de inversión para red de monitoreo de MP _{2,5}	53

Índice de Figuras

Figura 1. Imagen de la ciudad de Constitución, Región del Maule	4
Figura 2. Evolución de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en ciudades chilenas con monitoreo oficial	7
Figura 3. Índice Ambiental de la comuna de Constitución según la SUBDERE	7
Figura 4. Índice socioeconómico comunal de Constitución	10
Figura 5. Mapa de la zonificación altitudinal de la ciudad de Constitución	31
Figura 6. Gráfico de distribución de viviendas particulares por tipo de vivienda en la ciudad de Constitución	32
Figura 7. Evolución de las atenciones de urgencia por causas respiratorias en la Región del Maule (2019–2025)	34
Figura 8. Gráfico de la evolución anual de enfermedades respiratorias en los centros de urgencia en la ciudad de Constitución (2019–2025)	36
Figura 9. Evolución del número de atenciones respiratorias mensuales en la ciudad de Constitución (2019–2025)	38
Figura 10. Gráfico de la evolución del número de incendios forestales y superficie total afectada en la ciudad de Constitución (2014–2024)	40
Figura 11. Mapa de aptitud ambiental de la ciudad de Constitución	44
Figura 12. Mapa de propuesta de estaciones de monitoreo de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Constitución	46

1. Introducción

La contaminación atmosférica es hoy uno de los mayores desafíos ambientales y de salud pública a nivel mundial. Entre los distintos contaminantes presentes en el aire, el material particulado fino ($PM_{2,5}$) destaca por su impacto en las personas. Estas diminutas partículas, de menos de 2,5 micrómetros de diámetro, son capaces de penetrar profundamente en los pulmones y alcanzar el torrente sanguíneo, provocando efectos dañinos en los sistemas respiratorio y cardiovascular.

Diversos estudios internacionales han comprobado que la exposición prolongada a este tipo de contaminantes se asocia con un aumento en las enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso con la mortalidad prematura (Pope & Dockery, 2006; Brook et al., 2010). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), no existe un nivel seguro de exposición a $PM_{2,5}$ y, por ello, se han establecido límites más exigentes: 5 $\mu g/m^3$ como promedio anual y 15 $\mu g/m^3$ en 24 horas. En términos globales, se estima que la contaminación del aire es responsable de alrededor de 5,5 millones de muertes cada año (Lelieveld et al., 2015).

En Chile, este problema es muy concreto. La contaminación por humo de leña húmeda continúa siendo la principal causa del deterioro de la calidad del aire durante los meses fríos (de abril a septiembre). En ciudades como Temuco, Osorno, Coyhaique y Coronel, las concentraciones de $PM_{2,5}$ superan ampliamente los estándares nacionales e internacionales (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2023; IQAir, 2024).

La combinación del uso extendido de leña húmeda, de sistemas de calefacción ineficientes y de condiciones meteorológicas que dificultan la ventilación, como las inversiones térmicas, genera escenarios críticos cada invierno. Estudios de exposición individual han mostrado que durante episodios de inversión térmica las concentraciones personales de PM aumentan tanto en interiores como en exteriores, con diferencias promedio cercanas a 23 $\mu g/m^3$ entre ambos microambientes (Novak et al., 2022).

Pese a los avances normativos, como la promulgación de la Ley 21.499 sobre biocombustibles sólidos o la aplicación de los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) en algunas ciudades (MMA, 2015; Sabes.cl, 2025), aún persiste una brecha significativa en muchas comunas que carecen de estaciones de monitoreo. Sin datos confiables, resulta imposible dimensionar el problema ni diseñar estrategias locales efectivas para mitigarlo.

La comuna de Constitución, en la Región del Maule, es un claro ejemplo de esta realidad. Con una población de 47.004 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2024), su ubicación costera y la presencia de cordones montañosos favorecen la acumulación de contaminantes, especialmente durante el invierno.

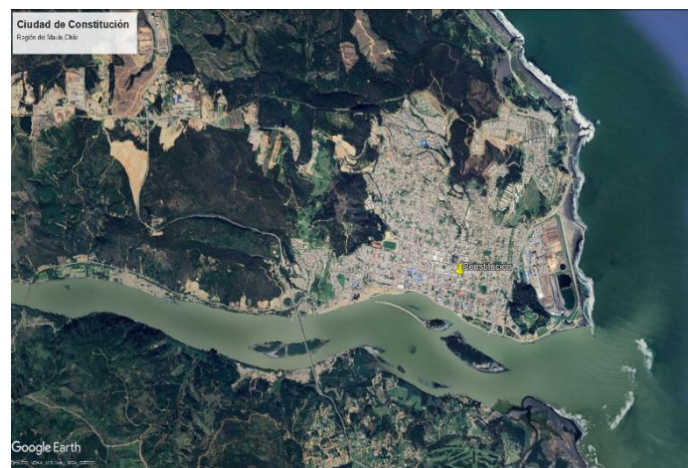


Figura 1. Ciudad de Constitución, Región del Maule, Chile. Fuente: Google Earth (2025).

A esto se suman las actividades industriales, forestales y residenciales, que generan emisiones constantes. Además, los incendios forestales e industriales como el mega-incendio *Las Máquinas* en 2017, o los ocurridos en 2024 y 2025, han liberado enormes volúmenes de humo y material particulado, deteriorando de forma temporal pero severa la calidad del aire (FAO, 2017; BioBioChile, 2024; Sabes.cl, 2025). Aunque la comunidad percibe la contaminación como un problema cotidiano, no existen registros oficiales que lo respalden. Esta falta de información impide conocer el nivel real de exposición de la población y su relación con los crecientes casos de enfermedades respiratorias, como bronquitis, neumonía y EPOC, observados en los últimos años (SEREMI de Salud del Maule, 2025).

La evidencia científica reciente refuerza la importancia de abordar esta situación. Estudios nacionales han demostrado que aumentos temporales en los niveles de $PM_{2,5}$ se relacionan con una mayor mortalidad en adultos mayores (Busch et al., 2024) y con una disminución del rendimiento académico en escolares expuestos crónicamente a este contaminante (González-Rojas et al., 2025). A nivel internacional, investigaciones han revelado que incluso concentraciones bajas inferiores a $10 \mu g/m^3$, pueden incrementar el riesgo de mortalidad (Edwards et al., 2024; Wendt Hess & Chan, 2025). Estos antecedentes evidencian que la contaminación del aire afecta no solo la salud física, sino también el bienestar social, la equidad ambiental y la calidad de vida.

Ante este escenario, surge la necesidad urgente de contar con un análisis técnico que permita identificar los sectores más adecuados para la futura instalación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la comuna de Constitución. La presente investigación busca generar una propuesta estratégica para la localización óptima de puntos de medición de material particulado fino ($PM_{2,5}$), utilizando criterios territoriales, sociales y ambientales que reflejen la realidad comunal.

Este enfoque busca aportar una herramienta técnica que fortalezca la planificación ambiental local y regional, proporcionando insumos estratégicos para la eventual implementación de instrumentos de gestión como Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA), en caso de que futuros monitoreos evidencien superaciones normativas. Asimismo, la propuesta puede servir como base para la declaración de zona latente o saturada, conforme a lo establecido en la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, permitiendo orientar decisiones municipales y regionales en materia de regulación de fuentes emisoras, eficiencia energética, recambio de calefactores y educación ambiental. De esta manera, la generación de una línea base

territorial constituye un paso previo indispensable para avanzar hacia una gestión ambiental basada en evidencia y alineada con la Estrategia Nacional de Calidad del Aire.

1.1. Contexto global del material particulado fino (PM_{2.5})

Constituye uno de los principales desafíos ambientales y sanitarios del siglo XXI. Este contaminante, compuesto por partículas sólidas y líquidas de diámetro inferior a 2,5 micrómetros, puede ingresar profundamente en el sistema respiratorio y alcanzar el torrente sanguíneo, provocando efectos adversos tanto en la salud humana como en los ecosistemas (Brook et al., 2010; OMS, 2021). A nivel global, la exposición prolongada al PM_{2.5} se asocia con millones de muertes prematuras anuales y con un incremento sostenido de enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Lelieveld et al., 2015).

En Chile, la problemática del PM_{2.5} se concentra principalmente en las zonas centro-sur, donde la calefacción residencial basada en leña húmeda es la principal fuente de emisiones durante el invierno. Ciudades como Temuco, Coyhaique, Coronel y Osorno superan reiteradamente los límites de la normativa nacional, con concentraciones que superan los 50 µg/m³ en 24 horas (MMA, 2023; IQAir, 2024).

Esta situación ha motivado la implementación de Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) y la promulgación de la Ley N.º 21.499, que regula los biocombustibles sólidos (Ministerio de Energía, 2022). Sin embargo, estas políticas se han centrado principalmente en urbes declaradas “zonas saturadas”, dejando fuera a comunas intermedias donde no existen datos sobre la calidad del aire ni herramientas de diagnóstico ambiental.

La comuna de Constitución, ubicada en la Región del Maule, representa un ejemplo de esta brecha territorial. Con una población de 47 004 habitantes (INE, 2024) y una ubicación geográfica costera, rodeada de cordones montañosos, presenta condiciones propicias para la acumulación de contaminantes durante el invierno. Este tipo de configuración geográfica, combinada con inversiones térmicas recurrentes, puede generar exposiciones individuales significativamente mayores a las que sugieren las estaciones fijas de monitoreo, tal como se ha observado en estudios realizados en cuencas urbanas europeas (Novak et al., 2022).

Las principales fuentes locales incluyen el uso domiciliario de leña húmeda, la actividad forestal e industrial, el transporte y los incendios forestales recurrentes, como el evento “Las Máquinas” en 2017 y los siniestros de 2024–2025, que liberaron grandes volúmenes de humo y material particulado (FAO, 2017; BioBioChile, 2024; Sabes.cl, 2025). A pesar de estos antecedentes, la Constitución no dispone de estaciones de monitoreo oficiales, por lo que no se cuenta con información cuantitativa sobre la calidad del aire ni con indicadores locales de exposición poblacional.

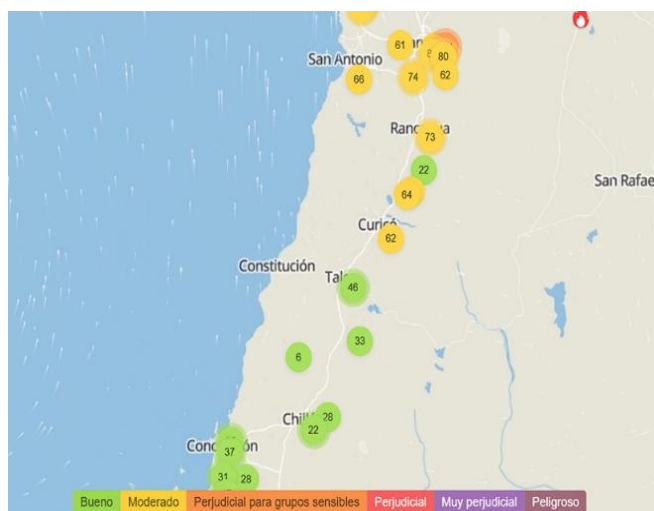


Figura 2. Mapa de calidad del aire en Chile. Se observe la ausencia de estaciones de monitoreo en Constitución. Fuente: IQAir (2025).

De acuerdo con la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE, 2025), la comuna de Constitución presenta un Índice Ambiental de 0,69, ligeramente superior al promedio regional del Maule (0,67). Este indicador evalúa el confort ambiental del territorio mediante la combinación de la amplitud térmica anual (14,96 °C) y la cobertura vegetal (93,81 %). Los resultados muestran contrastes internos: las zonas norte y costeras registran mejores condiciones ambientales, mientras que los sectores sur y rurales presentan menor confort debido a la escasa vegetación y a las mayores oscilaciones térmicas. Estas diferencias territoriales evidencian una vulnerabilidad ambiental heterogénea, lo que refuerza la necesidad de implementar sistemas locales de monitoreo ambiental para una gestión más equitativa y basada en evidencia.

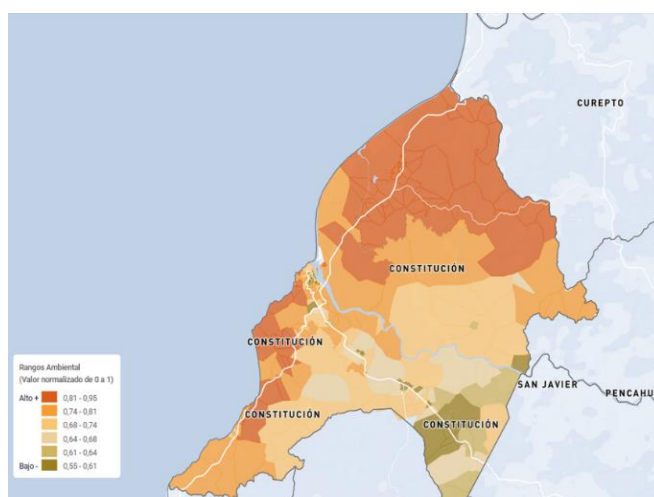


Figura. 3. Índice Ambiental de la comuna de Constitución según la Subdere (2025). Fuente: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (2025). Plataforma MABHT. <https://plataformabht.subdere.gov.cl/visualizaciones>

Esta ausencia de datos genera una doble problemática: por un lado, impide dimensionar la magnitud y la variabilidad espacial de la contaminación; y por otro, restringe la capacidad de diseñar políticas o medidas de mitigación basadas en evidencia. De acuerdo con la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (MMA, 2023), más del 70 % de las comunas chilenas no cuentan con información de monitoreo, lo que constituye una brecha crítica en la gestión ambiental nacional. La falta de información también limita la capacidad de respuesta sanitaria, pues dificulta correlacionar los episodios de contaminación con los registros de morbilidad respiratoria y cardiovascular (SEREMI de Salud del Maule, 2025).

En este contexto, la elaboración de un diagnóstico técnico sobre la localización óptima de estaciones de monitoreo de calidad del aire se convierte en una necesidad prioritaria. No se trata de instalar equipos de medición inmediatos, sino de establecer una base metodológica que permita identificar los sectores más representativos del territorio para futuros sistemas de observación. Estudios internacionales han demostrado que la ubicación estratégica de las estaciones de monitoreo determina la efectividad de las redes y la confiabilidad de los datos. Por ejemplo, Romary, Malherbe y de Fouquet (2014) aplicaron modelos geoestadísticos en Francia para determinar sitios óptimos que redujeran la incertidumbre espacial en mapas de contaminación; mientras que Hacıoğlu et al. (2016) propusieron un enfoque de decisión multicriterio (MCDM) que combinó criterios técnicos, sociales y logísticos para la selección de sitios en Turquía.

En paralelo, investigaciones recientes respaldan la viabilidad técnica de redes de sensores de bajo costo como alternativa complementaria a los sistemas tradicionales. Cavaliere et al. (2018) demostraron que, mediante calibración y control de calidad, los sensores de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} pueden alcanzar correlaciones superiores al 90 % con equipos de referencia, lo que valida su uso en monitoreo ambiental distribuido. Asimismo, Zhang y Woo (2020) evidenciaron en Corea del Sur que el uso combinado de sensores fijos y móviles conectados a Internet de las Cosas (IoT) mejora la resolución espacial y temporal de los datos, optimizando la gestión local de la calidad del aire.

La revisión de estos antecedentes permite justificar la relevancia y pertinencia del presente diagnóstico técnico, cuyo objetivo es generar una propuesta estratégica para el emplazamiento de futuras estaciones de monitoreo en Constitución. Esta propuesta busca integrar variables territoriales (topografía, uso de suelo, densidad poblacional), sociales (vulnerabilidad, exposición) y ambientales (fuentes emisoras, meteorología) para definir zonas prioritarias de observación.

En definitiva, el problema ambiental abordado no radica únicamente en la contaminación por $PM_{2.5}$, sino en la ausencia de información sistematizada y territorialmente representativa que permita comprenderla. Superar esta brecha de conocimiento es el primer paso para diseñar estrategias de gestión ambiental y de salud pública basadas en evidencia, contribuyendo al cumplimiento de los compromisos nacionales de calidad del aire y a la equidad ambiental entre territorios.

2. Antecedentes

2.1. Relación del problema ambiental con la sociedad

La contaminación atmosférica por material particulado fino ($PM_{2.5}$) trasciende la dimensión ambiental y se convierte en un problema social, sanitario y territorial. Este contaminante afecta directamente el bienestar, la calidad de vida y la equidad entre comunidades, ya que su distribución espacial y sus efectos en la salud dependen fuertemente de factores socioeconómicos, tecnológicos y culturales. La exposición prolongada a concentraciones elevadas de $PM_{2.5}$ incrementa la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, deteriora la función pulmonar y acorta la esperanza de vida, afectando con especial severidad a los grupos más vulnerables: niños, adultos mayores y personas con enfermedades crónicas (Brook et al., 2010; OMS, 2021; Pope & Dockery, 2006).

En Chile, esta problemática refleja una profunda desigualdad ambiental y energética. Las comunas del centro y sur del país que dependen del uso de leña húmeda para la calefacción concentran los episodios más críticos de contaminación durante el invierno (MMA, 2023). Sin embargo, este consumo no responde a una elección, sino a una necesidad: la leña es, muchas veces, la única fuente de energía accesible para los hogares de menores ingresos (Ministerio de Energía, 2022). De esta forma, la contaminación atmosférica se entrelaza con fenómenos estructurales como la pobreza energética, el déficit térmico habitacional y la falta de acceso a combustibles limpios, lo que genera una doble vulnerabilidad social y ambiental.

En la comuna de Constitución, esta relación entre la contaminación y la desigualdad se expresa con claridad. Durante los meses fríos (entre abril y septiembre), gran parte de la población utiliza leña húmeda como fuente principal de calefacción, debido a su bajo costo y amplia disponibilidad (INE, 2024). Esta práctica produce emisiones visibles y persistentes que afectan la calidad del aire urbano, especialmente en los valles y depresiones donde las condiciones topográficas y meteorológicas —como las inversiones térmicas y la baja ventilación— favorecen la acumulación de contaminantes. La población, por su parte, percibe la contaminación como parte de su cotidianidad: “olor a humo” o “cielos grises” se han normalizado en los sectores residenciales (SEREMI de Salud del Maule, 2025).

De acuerdo con la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE, 2025), la comuna de Constitución presenta un Índice Socioeconómico de 0,65, levemente inferior al promedio regional del Maule (0,66). Este indicador refleja las condiciones estructurales del bienestar territorial, incluyendo dimensiones como la calidad y la suficiencia de la vivienda, el nivel educativo, el empleo y la resiliencia de los hogares.

Los resultados muestran una marcada heterogeneidad espacial: las zonas costeras y céntricas exhiben valores más altos (0,70–0,77), mientras que los sectores rurales y periféricos, especialmente hacia el oriente y el sur de la comuna, registran índices bajos (0,53–0,60), asociados a déficits habitacionales y a una menor calidad de vivienda.

Esta desigualdad habitacional se relaciona directamente con el aumento del uso de leña húmeda para la calefacción, ya que las viviendas con aislamiento térmico deficiente requieren un mayor consumo energético para alcanzar temperaturas confortables. En consecuencia, la población de menores ingresos, ubicada precisamente en los sectores con peor calidad de vivienda, depende en mayor medida de la leña como fuente de calor accesible, lo que intensifica las emisiones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) durante los meses fríos (abril a septiembre).

Este patrón territorial confirma que la contaminación atmosférica por el uso de leña en Constitución no solo es un problema ambiental, sino también una expresión de desigualdad social y pobreza energética, donde las condiciones materiales de la vivienda influyen directamente en la generación de contaminantes.

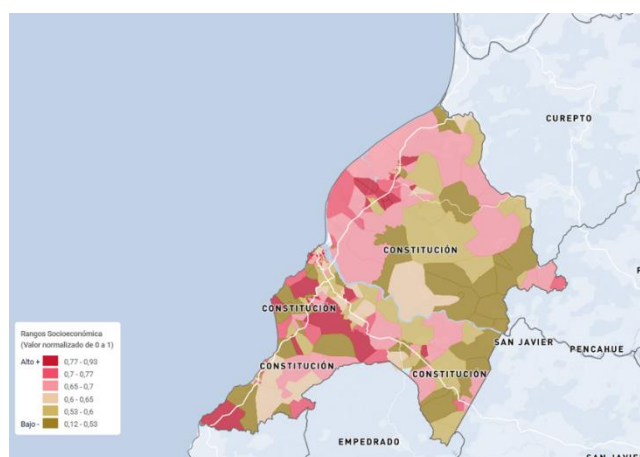


Figura 4. Índice Socioeconómico comunal de Constitución (SUBDERE, 2025).
Fuente: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (2025). Plataforma MABHT. <https://plataformabht.subdere.gov.cl/visualizaciones>

Esta exposición cotidiana deteriora la salud física y emocional, impacta en la asistencia escolar y laboral, y genera una sensación de resignación ambiental, donde el problema es visible, pero carece de soluciones locales.

Los impactos de la contaminación no se limitan a la salud. Desde un enfoque económico y ecosistémico, el $PM_{2.5}$ altera los servicios ambientales urbanos, disminuye la visibilidad, afecta la percepción de habitabilidad y produce daños materiales por corrosión, limpieza y mantenimiento. A escala macroeconómica, el Banco Mundial estima que los costos asociados a la contaminación atmosférica oscilan entre el 2 % y 4 % del PIB anual en países con fuerte dependencia de combustibles sólidos (Cohen et al., 2017). En territorios costeros como Constitución, estos impactos se reflejan también en una pérdida de atractivo turístico y en la degradación de los ecosistemas asociados al borde fluvial y marino, que constituyen fuentes de sustento para el comercio y la pesca artesanal.

La relación entre la sociedad y el problema ambiental es, además, bidireccional. Por un lado, las prácticas humanas —como la quema de leña, residuos o restos agrícolas— contribuyen a la emisión de contaminantes; y por otro, las consecuencias de esas emisiones recaen nuevamente sobre la población, perpetuando un ciclo de vulnerabilidad ambiental y social. Esta situación se agrava en contextos en los que la información sobre la calidad del aire es escasa o inaccesible. En Constitución, la ausencia de estaciones de monitoreo impide cuantificar la exposición real y limita la capacidad de respuesta institucional, lo que genera injusticia ambiental al privar a la comunidad de datos que podrían sustentar decisiones preventivas y políticas locales de salud pública (IQAir, 2025; Gouveia et al., 2018).

Diversos estudios han demostrado que el acceso a información ambiental oportuna puede transformar la conducta social y fortalecer la gobernanza local. Experiencias de monitoreo ciudadano en Europa y América Latina evidencian que la participación comunitaria en la generación de datos mejora la percepción del riesgo, fomenta la corresponsabilidad y promueve la acción colectiva (Kumar et al., 2015; Castell et al., 2018). De igual forma, el desarrollo de herramientas digitales de visualización y comunicación ambiental ha permitido democratizar la información y reducir la brecha entre el conocimiento técnico y la comprensión social del problema (Schneider et al., 2017).

Por ello, el análisis que sustenta esta investigación asume que la contaminación atmosférica en Constitución no es solo un problema técnico, sino también un problema social y de justicia ambiental. La falta de datos y de monitoreo perpetúa la invisibilidad del riesgo y limita la capacidad de acción comunitaria e institucional. Generar una propuesta técnica estratégica para identificar los lugares óptimos para instalar futuras estaciones de monitoreo constituye un paso esencial hacia la equidad ambiental: proporciona conocimiento, fortalece la gobernanza local y contribuye a que las decisiones públicas se basen en evidencia científica y territorialmente representativa.

2.2. Impactos ambientales identificados

La contaminación atmosférica por material particulado fino ($PM_{2.5}$) constituye uno de los agentes más relevantes en la degradación de los ecosistemas urbanos y rurales. Su presencia persistente en la atmósfera altera el equilibrio natural de los sistemas ambientales, afectando los ciclos biogeoquímicos, la estabilidad climática y la integridad de los ecosistemas terrestres y acuáticos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), las partículas finas actúan como vectores de contaminantes secundarios, como metales pesados, compuestos orgánicos volátiles (COV) y carbono negro, que pueden depositarse en suelos, cuerpos de agua y vegetación, modificando sus propiedades químicas y biológicas.

A nivel atmosférico, la presencia de $PM_{2.5}$ reduce la visibilidad y contribuye a la formación de smog fotoquímico, un fenómeno que afecta el equilibrio radiactivo terrestre y la calidad del aire. Este proceso genera microclimas urbanos más cálidos, altera el flujo de energía superficial y aumenta el consumo energético destinado a la calefacción y la refrigeración, lo que intensifica las emisiones de gases de combustión (Lelieveld et al., 2015; MMA, 2023). En zonas costeras e intermedias, como Constitución, estas alteraciones adquieren relevancia particular, ya que los vientos predominantes y las inversiones térmicas invernales dificultan la dispersión de contaminantes, lo que permite su acumulación en los valles y sectores bajos de la comuna.

El impacto del $PM_{2.5}$ sobre los ecosistemas terrestres se manifiesta principalmente a través de la deposición de partículas, tanto seca como húmeda. Estos depósitos alteran la composición química del suelo, reducen su fertilidad y afectan el microbiota responsable de los procesos de procesamiento y regeneración (FAO, 2017). En el contexto de Constitución, la deposición de material particulado y cenizas se ha observado con mayor intensidad tras eventos de incendios forestales e industriales, como los ocurridos en 2017, 2024 y 2025 (BioBioChile, 2024; Sabes.cl, 2025). Dichos eventos han provocado la pérdida de cobertura vegetal nativa y la erosión de los suelos, lo que afecta la capacidad natural del territorio para capturar carbono y regular el clima local.

La exposición prolongada de la vegetación a contaminantes atmosféricos provoca daños fisiológicos evidentes: clorosis, necrosis foliar, reducción de la fotosíntesis y menor crecimiento (Gouveia et al., 2018). Estos efectos disminuyen la capacidad de la vegetación urbana y periurbana para actuar como sumideros naturales de contaminantes, lo que afecta el equilibrio del ecosistema y la prestación de servicios ambientales esenciales, como la regulación térmica, la retención de polvo y la captura de CO_2 . Además, la pérdida de masa vegetal reduce la infiltración de agua de lluvia, lo que aumenta el escurrimiento superficial y el riesgo de erosión en zonas ribereñas y de pendiente.

Los ecosistemas acuáticos también se ven gravemente afectados por la contaminación atmosférica. Las partículas finas y el carbono negro que se depositan sobre la superficie de ríos o estuarios pueden modificar la transparencia, la temperatura y la oxigenación del agua, afectando la biodiversidad y los procesos de fotosíntesis acuáticas (FAO, 2017). En el caso del río Maule, que atraviesa la comuna de Constitución, el arrastre de cenizas y residuos tras los incendios forestales ha incrementado la turbidez y alterado la dinámica ecológica de los estuarios costeros, lo que ha interferido en los hábitats de peces y macroinvertebrados acuáticos. Estos impactos, sumados al arrastre de contaminantes atmosféricos hacia el mar, contribuyen a la eutrofización costera y la degradación de los ecosistemas marino-fluviales.

Desde un punto de vista climático, el carbono negro, uno de los principales componentes del PM_{2.5}, ejerce una influencia directa sobre el calentamiento global. Este material absorbe la radiación solar y contribuye al forzamiento radiativo positivo, lo que acelera el derretimiento de superficies heladas y aumenta la temperatura local y regional (Lelieveld et al., 2015). Aunque este fenómeno se ha documentado principalmente en regiones polares y urbanas densamente industrializadas, su presencia en zonas intermedias como Constitución puede potenciar el efecto isla de calor y modificar la humedad relativa, afectando tanto a la flora como a la fauna local.

La literatura científica también evidencia que la contaminación atmosférica puede alterar los servicios ecosistémicos que sustentan la calidad de vida de las comunidades humanas. La acumulación de material particulado en el aire y en las superficies reduce la calidad estética y paisajística, afecta el turismo y disminuye la valoración social del entorno natural (Cohen et al., 2017; MMA, 2023). Asimismo, la deposición en suelos agrícolas puede provocar pérdidas de productividad debido a la contaminación del follaje o al bloqueo de la radiación solar, lo que afecta los rendimientos en cultivos de pequeña escala, relevantes en el entorno rural de Constitución.

La persistencia de estos impactos refleja un proceso de degradación ambiental acumulativa, donde los contaminantes atmosféricos se movilizan a través de la atmósfera, el suelo y el agua, manteniendo su efecto a largo plazo incluso tras la reducción temporal de las emisiones. Este tipo de contaminación difusa es especialmente complejo de abordar en territorios sin monitoreo continuo, donde la ausencia de datos impide evaluar la magnitud del daño ecológico y dificulta implementar estrategias de mitigación basadas en evidencia.

En este contexto, si bien existen indicadores territoriales desarrollados por instituciones públicas, como el *Índice Ambiental* y el *Índice Socioeconómico* de la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE, 2025), estos se orientan al confort ambiental y bienestar social, pero no incluyen parámetros de calidad del aire. La comparación entre ambos tipos de información revela una brecha significativa en la disponibilidad de datos atmosféricos locales, en particular en comunas como Constitución.

Diversos estudios confirman que las ciudades que disponen de redes de monitoreo ambiental y planes de gestión atmosférica logran reducir significativamente los impactos del $PM_{2.5}$ sobre el entorno natural (Castell et al., 2018; Schneider et al., 2017). La ausencia de una red de observación en la Constitución impide conocer con precisión las concentraciones locales, las variaciones estacionales y los patrones espaciales de dispersión de contaminantes. Esta brecha de información constituye una limitación crítica para la gestión ambiental, ya que restringe la capacidad del municipio y de los organismos regionales para anticipar riesgos y planificar acciones preventivas.

En síntesis, los impactos ambientales asociados al $PM_{2.5}$ en la comuna de Constitución se manifiestan en la degradación de la calidad del aire, las alteraciones de suelos y cuerpos de agua, la pérdida de vegetación, la afectación de ecosistemas ribereños y costeros, y la modificación del clima local. Este conjunto de efectos demuestra que la contaminación atmosférica no solo representa un problema sanitario, sino también una amenaza para la integridad ecológica y la sostenibilidad del desarrollo comunal. Frente a ello, el presente estudio propone abordar el problema desde una perspectiva técnica y territorial, generando una propuesta de localización estratégica para futuras estaciones de monitoreo ambiental, que permita comprender y mitigar los impactos del $PM_{2.5}$ de manera integrada y basada en evidencia científica.

2.3. Normativa Nacional e Internacional relacionada con el problema ambiental

El marco normativo de calidad del aire en Chile ha experimentado importantes avances en las últimas décadas, orientados a reducir los impactos de la contaminación por material particulado fino ($PM_{2,5}$). Sin embargo, persisten brechas normativas y territoriales que dificultan la gestión ambiental equitativa entre regiones. Estas diferencias se reflejan tanto en la exigencia de los estándares como en la cobertura de monitoreo, especialmente en comunas intermedias como Constitución, que carecen de información local sobre la calidad del aire (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2023).

2.3.1. Normativa nacional vigente

La Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, promulgada en 1994, constituye el eje central de la política ambiental chilena. Esta ley establece los instrumentos de gestión ambiental, normas de calidad, normas de emisión y planes de prevención o descontaminación, que permiten regular las fuentes emisoras y proteger la salud de la población (MMA, 1994).

En su marco se dictó el Decreto Supremo (DS) N.º 12/2011 del Ministerio del Medio Ambiente, que fija la Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable ($PM_{2,5}$), con un límite anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (promedio móvil de 24 horas). Estos valores, aunque representaron un avance, son más permisivos que los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), que recomienda $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anuales y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diarios.

El DSNº 12/2022 actualizó los criterios de episodios críticos de contaminación, armonizando metodologías de evaluación y comunicación con base en evidencia científica reciente (MMA, 2022). Estas disposiciones complementan los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), regulados en el artículo 44 de la Ley 19.300, que permiten declarar “zonas saturadas” o “latentes” cuando se exceden reiteradamente los valores límite. Las PDA definen medidas como la sustitución de calefactores, la restricción de uso de leña húmeda y la educación ambiental (MMA, 2015).

Un ejemplo es el PDA de coronel (DSNº 8/2015), que implementó programas de reemplazo de calefactores y fiscalización del uso de leña, reduciendo episodios críticos invernales (MMA, 2015).

En 2022, la Ley N.º 21.499 reguló los biocombustibles sólidos (leña, pellets, briquetas, carbón vegetal y astillas), estableciendo requisitos de registro, certificación de calidad y humedad, con el fin de reducir las emisiones difusas en el sector residencial (Ministerio de Energía, 2022). Esta ley impulsa la transición energética y la formalización del mercado de la leña, uno de los principales contribuyentes a la contaminación invernal en el centro-sur de Chile.

Pese a estos avances, el marco normativo enfrenta desafíos relevantes: la diferencia con los estándares internacionales y la limitada cobertura de monitoreo. Según la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (MMA, 2023), un 70 % de las comunas chilenas no cuentan con estaciones de medición, lo que impide declarar zonas saturadas y aplicar planos de descontaminación basados en evidencia territorial.

2.3.2. Normativa y compromisos internacionales

En el ámbito internacional, Chile se guía principalmente por las Guías de Calidad del Aire de la OMS (2021), que recomiendan mantener las concentraciones anuales de PM_{2.5} bajo 5 µg/m³ y los promedios diarios bajo 15 µg/m³. Estas guías, aunque no vinculantes, constituyen el referente técnico internacional para la formulación de políticas nacionales.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) actualizó en 2024 su norma nacional de calidad del aire (NAAQS) para PM_{2.5}, reduciendo el límite anual a 9 µg/m³ y manteniendo el límite diario en 35 µg/m³ (US Environmental Protection Agency [EPA], 2024). En la Unión Europea, la Directiva 2008/50/CE fija un promedio anual de 25 µg/m³, aunque en 2024 se alcanzó un acuerdo político para reducirlo a 10 µg/m³ al 2030, en línea con las metas del Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2024).

Chile también forma parte del Acuerdo de París (ratificado en 2017), mediante el cual se comprometió a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y a avanzar hacia una transición energética baja en carbono, lo que conlleva beneficios directos para la calidad del aire (MMA, 2017). Asimismo, participa en la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC), impulsada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022), que busca disminuir los contaminantes climáticos de vida corta, como el carbono negro y el metano, ambos estrechamente relacionados con el PM_{2.5}.

Tabla I. Comparación internacional de normas de calidad del aire para PM_{2.5}

JURISDICCIÓN / ORGANISMO	LÍMITE ANUAL (µg/m³)	LÍMITE 24 H (µg/m³)	BASE LEGAL / FUENTE
CHILE	20	50	DS N° 12/2011 del Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2012)
OMS (GUÍAS 2021)	5	15	Organización Mundial de la Salud (2021), Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire
ESTADOS UNIDOS (EPA)	9	35	Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (2024), Estándares nacionales de calidad del aire ambiental para PM _{2.5}
UNIÓN EUROPEA	25 (real) ->10 (2030)	35	Comisión Europea (2024), Revisión de la Directiva sobre la calidad del aire ambiente de la UE

Nota. La tabla muestra los valores anuales y diarios de referencia para material particulado fino (PM_{2.5}) según las principales entidades reguladoras internacionales. Los datos reflejan la brecha entre el estándar chileno y los límites recomendados por la OMS y las agencias internacionales.

En síntesis, Chile cuenta con un marco legal consolidado, normas primarias de calidad del aire, instrumentos de gestión (PDA) y regulación de biocombustibles sólidos, lo que representa avances sustantivos. Sin embargo, las metas nacionales siguen siendo menos estrictas que las recomendaciones de la OMS (2021), la EPA (2024) y la Unión Europea (2024). Esta diferencia, sumada a la atención de monitoreo en territorios intermedios, limita la capacidad del país para evaluar de

manera integral la exposición de la población y la magnitud real de la contaminación atmosférica.

Por ello, el fortalecimiento de las redes de monitoreo y la generación de propuestas técnicas de localización estratégica de estaciones como la desarrollada en esta investigación se vuelven esenciales para reducir la brecha normativa y territorial, mejorar la gestión ambiental y avanzar hacia el cumplimiento progresivo de los compromisos internacionales en materia de salud y cambio climático.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Proponer un sistema de monitoreo en línea de material particulado fino (MP_{2,5}) para la comuna de Constitución como herramienta estratégica para la gestión ambiental y la protección de la salud pública.

3.2. Objetivos específicos

- Estado del arte sobre los impactos del MP_{2,5} en la salud pública y el medio ambiente, considerando normativas nacionales e internacionales de calidad del aire.
- Realizar un catastro de fuentes estáticas y móviles de emisión de MP_{2,5} en Constitución, utilizando evidencia visual (fotografías y videos) y diagnóstico participativo.
- Proponer una red de estaciones de monitoreo de MP_{2,5} con geolocalización estratégica, validada con actores locales

4. Metodología

La presente investigación adopta un enfoque interdisciplinario, aplicado y participativo, orientado a proponer una red de monitoreo en línea de material particulado fino ($PM_{2.5}$) para la comuna de Constitución, en ausencia de una infraestructura de medición existente. Dado que la ciudad no cuenta con estaciones oficiales de monitoreo ni equipamiento disponible para mediciones directas, la metodología se basa en un análisis espacial y multicriterio que integra la información secundaria, variables territoriales y criterios técnicos de optimización, complementado con un diagnóstico participativo local y evidencia visual directa obtenida mediante registros fotográficos.

El proceso metodológico se estructura en tres fases complementarias, diseñadas para cumplir los objetivos específicos y alcanzar el objetivo general del estudio.

4.1 Fase 1. Análisis documental y sistematización de información de secundaria

El punto de partida consiste en la revisión y análisis sistemático de información científica, normativa y territorial vinculada con la calidad del aire y la contaminación por $PM_{2.5}$.

Fuentes de información:

- Bases de datos académicas para identificar estudios recientes sobre monitoreo de $PM_{2.5}$ y su impacto en la salud y el ambiente (OMS, 2021; Edwards et al., 2024).
- Informes técnicos y estadísticas nacionales, como el *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos* (SENACE, 2022) y la *Estrategia Nacional de Calidad del Aire* (MMA, 2023).
- Cartografía base: límites administrativos, uso de suelo, densidad poblacional (INE, 2024), y variables meteorológicas obtenidas del sistema SINCA y la Dirección Meteorológica de Chile.
- Reportes de calidad del aire de plataformas internacionales (IQAir, 2024–2025), usados como referencia comparativa.

Procedimiento:

1. Clasificación de la literatura y de los datos secundarios según su pertinencia temática: fuentes emisoras, impacto en la salud, herramientas SIG y experiencias de monitoreo ciudadano.
2. Elaboración de una matriz de información que relaciona variables ambientales (fuentes, topografía, clima) y variables sociales (densidad poblacional, vulnerabilidad).
3. Síntesis crítica de los modelos y metodologías internacionales aplicables al contexto chileno y comunal.

4.2 Fase 2. Análisis espacial y diagnóstico territorial de fuentes emisoras

Dado que en la ciudad de Constitución no existen mediciones empíricas de $PM_{2.5}$, el estudio emplea una metodología de análisis espacial predictivo basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de MCDM para identificar sitios teóricamente óptimos para futuras estaciones de monitoreo. Esta fase integra la observación directa y la evidencia visual como respaldo territorial al análisis.

Variables de entrada:

- Fuentes emisoras potenciales: sectores residenciales con uso intensivo de leña húmeda, áreas industriales y ejes viales principales.
- Variables físicas: altitud, pendiente y dirección predominante del viento (modelos topográficos de Topographic-map.com, 2025).
- Variables sociales: densidad poblacional, índice de vulnerabilidad socioambiental y accesibilidad a infraestructura eléctrica.

Instrumentos y procedimientos:

1. Registro fotográfico georreferenciado mediante dispositivo móvil. Se realizó un levantamiento visual de evidencia mediante fotografías capturadas con teléfono celular en distintos puntos estratégicos de la ciudad de Constitución, abarcando sectores residenciales, industriales y vías principales. El objetivo de este registro fue identificar visualmente fuentes emisoras potenciales de material particulado fino, tales como humo proveniente de calefacción residencial a leña, chimeneas industriales, emisiones visibles y flujo vehicular en zonas urbanas.

Para cada registro fotográfico se identificó la ubicación aproximada del punto de observación mediante herramientas digitales de geolocalización, tales como las coordenadas GPS del dispositivo móvil, mapas en línea y cartografía base de apoyo, incluyendo OpenStreetMap. Estas coordenadas fueron utilizadas posteriormente como referencia espacial para integrar los puntos observados al análisis SIG en QGIS.

En el sector residencial, se documentaron emisiones visibles asociadas a combustión de leña húmeda en distintos días y horarios, con énfasis en la temporada invernal, debido a que corresponde al período de mayor uso de calefacción domiciliaria. En el sector industrial, se registraron fuentes estacionarias visibles, tales como chimeneas activas y emisiones puntuales, con el fin de caracterizar su posible aporte al material particulado. Las fotografías no fueron obtenidas mediante una cámara especializada ni mediante instrumentación atmosférica, sino que corresponden a evidencia visual de apoyo territorial. Por lo tanto, su función dentro del estudio fue complementar el diagnóstico espacial, respaldar la identificación de fuentes emisoras y aportar evidencia contextual para la posterior propuesta de localización de estaciones de monitoreo. Este procedimiento permitió vincular la percepción visual del problema ambiental con una referencia espacial verificable, otorgando mayor trazabilidad al catastro de fuentes emisoras.

2. Integración de todas las capas temáticas y de los registros visuales en QGIS 3.34.
3. Asignación de ponderaciones a las variables mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), siguiendo la metodología de Hacıoğlu et al. (2016).
4. Aplicación de un modelo de superposición ponderada (Weighted Overlay) para generar un mapa de aptitud ambiental, clasificando las zonas comunales según su prioridad para instalación de estaciones de monitoreo.

5. Validación preliminar del modelo a través de entrevistas y revisión con actores municipales y comunitarios, considerando criterios logísticos y de aceptación local.

Es importante recalcar que el enfoque multicriterio ha sido aplicado con éxito en territorios sin redes de monitoreo formales. Romary, Malherbe y de Fouquet (2014) demostraron que la optimización espacial mediante el kriging y modelos bayesianos reduce la incertidumbre y mejora la representatividad territorial de las redes. Complementariamente, los métodos MCDM permiten incorporar factores sociales y de factibilidad local (Elbir et al., 2020).

4.2.1 Determinación de ponderaciones mediante el método AHP

Con el propósito de fortalecer la trazabilidad metodológica del modelo multicriterio aplicado en la presente investigación, se utilizó el método de Análisis Jerárquico Analítico, conocido como AHP por sus siglas en inglés (Analytic Hierarchy Process), para determinar la importancia relativa de los criterios utilizados en la identificación de zonas prioritarias para el monitoreo de MP_{2.5} en la ciudad de Constitución.

Este método permite comparar los criterios de manera pareada, asignando valores de importancia relativa según la escala propuesta por Saaty. En este estudio, los criterios considerados fueron: uso de leña (UL), fuentes emisoras (FE), densidad poblacional (DP), vulnerabilidad social (VS) y ventilación (VE). Estos criterios fueron seleccionados en función de los antecedentes territoriales, ambientales y socioeconómicos desarrollados en el diagnóstico, considerando su influencia potencial en la generación, acumulación y exposición al material particulado fino.

La matriz de comparación por pares utilizada se presenta en la Tabla II.

Tabla II. Matriz de comparación por pares aplicada mediante el método AHP

Criterio	UL	FE	DP	VS	VE
UL	1	3	5	5	7
FE	1/3	1	3	3	5
DP	1/5	1/3	1	3	5
VS	1/5	1/3	1/3	1	3
VE	1/7	1/5	1/5	1/3	1

Nota. UL: uso de leña; FE: fuentes emisoras; DP: densidad poblacional; VS: vulnerabilidad social; VE: ventilación. Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta matriz, las ponderaciones fueron obtenidas mediante la normalización por columnas y el cálculo del promedio de cada fila. Posteriormente, la consistencia de los juicios fue evaluada mediante el índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (CR), utilizando las siguientes expresiones:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

donde λ_{max} corresponde al valor propio máximo de la matriz, n al número de criterios evaluados y RI al índice aleatorio definido para matrices de igual tamaño.

4.3 Fase 3. Diseño conceptual de red de monitoreo y propuesta tecnológica

Una vez identificadas las zonas prioritarias, se desarrolla la propuesta conceptual de red de monitoreo, que no implica la instalación real de equipos, sino una simulación de una red comunitaria de bajo costo, sustentada en evidencia científica sobre tecnologías IoT y sensores validados internacionalmente. La literatura reciente respalda el uso de sensores de bajo costo para el monitoreo ambiental, siempre que se implementen procesos adecuados de calibración y control de calidad, dado que estos sensores presentan variaciones significativas según la temperatura, la humedad y las condiciones locales (Chacón-Mateos et al., 2025).

Referentes técnicos reales:

- Red AIRQino (Italia): Cavaliere et al. (2018) validaron estaciones de bajo costo, con correlaciones superiores al 90 % con respecto a equipos de referencia.
- Open Sense Zurich (Suiza): Jerrett et al. (2017) demostraron la factibilidad de integrar sensores ciudadanos para obtener datos de alta resolución espacial.
- OMM (2023): La *Organización Meteorológica Mundial* recomienda incorporar redes de *Low-Cost Sensors* en territorios sin cobertura oficial, como apoyo a la gestión local (Informe GAW No. 293).

La literatura especializada demuestra que los sensores de bajo costo presentan desempeños muy variables y dependen fuertemente de factores ambientales, de la calibración y del tipo de tecnología empleada. Una revisión que integra más de 1400 pruebas independientes confirma que la precisión de estos dispositivos puede oscilar ampliamente (R^2 entre 0,4 y 1,0) y que es indispensable implementar protocolos de calibración y verificación para garantizar datos confiables (Karagulian et al., 2019). En coherencia con la evidencia internacional, el presente proyecto posiciona el sensor de bajo costo seleccionado como un dispositivo complementario a la red oficial de monitoreo, orientado a aumentar la resolución espacial de la información y facilitar la comunicación de riesgos con la comunidad, más que a sustituir los métodos de referencia establecidos (Morawska et al., 2018).

Procedimiento:

1. Definición de requisitos técnicos para estaciones futuras: tipo de sensor óptico, alimentación fotovoltaica, conectividad IoT y compatibilidad con plataformas abiertas (IQAir AirVisual Pro, PurpleAir PA-II).

2. Diseño teórico de red: número estimado de estaciones, cobertura comunitaria y distribución geográfica basada en el mapa de aptitud.
3. Modelación de flujo de datos: adquisición → transmisión → almacenamiento → visualización pública mediante paneles (*Dashboards*).
4. Elaboración de manual de implementación y mantenimiento alineado con protocolos internacionales (OMM, 2023)

5 Resultados

5.1 Resultados del estado del arte y revisión normativa

El análisis detallado de la literatura científica y normativa permitió identificar los principales elementos técnicos que fundamentan la propuesta de un sistema de monitoreo ambiental para la comuna de Constitución. La síntesis normativa reveló una diferencia sustantiva entre los límites de concentración de $PM_{2.5}$ establecidos por la normativa chilena vigente y las recomendaciones internacionales más exigentes. Esta brecha normativa es especialmente relevante para territorios sin mediciones oficiales, como Constitución, donde la ausencia de datos locales impide evaluar la exposición real de la población y el cumplimiento efectivo de estándares de calidad del aire.

Adicionalmente, la revisión del estado del arte permitió identificar tecnologías de monitoreo de bajo costo, validadas internacionalmente, que han demostrado eficiencia para mediciones continuas de $PM_{2.5}$ en territorios sin estaciones oficiales. El uso de sensores ópticos e infraestructura IoT representa una alternativa técnicamente viable para comunas con limitaciones presupuestarias o geográficas, y constituye una base sólida para la propuesta conceptual de red de monitoreo que se presenta en esta investigación.

Tabla III. Síntesis de resultados del estado del arte y normativa aplicable

Categoría analizada	Resultado obtenido	Implicancia para Constitución
Normas nacionales	Límite anual $PM_{2.5}$: 20 $\mu g/m^3$	Posible subestimación de riesgo real
Recomendaciones OMS	Límite anual $PM_{2.5}$: 5 $\mu g/m^3$	Necesidad de generar datos locales
Tecnologías disponibles	Sensores ópticos de bajo costo validados	Factibilidad de monitoreo continuo
Brecha normativa	Diferencia de 15 $\mu g/m^3$ respecto a OMS	Necesidad de evidencia local

5.1.1 Evidencia científica que fundamenta la necesidad de un sistema de monitoreo de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Constitución

Con el fin de fortalecer la base científica que sustenta la presente propuesta de monitoreo atmosférico, se sistematizaron diversos estudios nacionales e internacionales que analizan los efectos del material particulado fino ($PM_{2.5}$) en la salud humana, así como las emisiones provenientes de fuentes fijas, móviles y residenciales. Esta revisión complementa el diagnóstico territorial y sanitario previamente presentado, y permite contextualizar los resultados obtenidos para la ciudad de Constitución dentro de un marco de conocimiento global validado.

Los estudios analizados se agrupan en cuatro categorías principales:

- Efectos del $PM_{2.5}$ en la salud humana,
- Emisiones asociadas a la quema de leña,
- Emisiones industriales (celulosa y papel),

- Emisiones vehiculares.

Cada una de estas líneas aporta evidencia directa sobre el impacto ambiental y sanitario relevante para territorios con características similares a Constitución, donde la combinación de uso de leña residencial, actividad industrial y tránsito vehicular contribuye significativamente a la contaminación atmosférica.

5.1.2 Evidencia científica sobre impactos en salud asociados a la exposición prolongada a PM_{2.5}

La Tabla IV sintetiza los principales estudios recientes que examinan la relación entre la exposición ambiental a PM_{2.5} y sus efectos en la salud. En conjunto, estos trabajos demuestran que el PM_{2.5} se asocia con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, respiratorias y neurodegenerativas, partos prematuros y deterioro cognitivo.

Estos resultados respaldan el hallazgo local de un incremento sostenido en las atenciones respiratorias (2019–2025), lo que sugiere que la población de Constitución se encuentra expuesta a factores de riesgo ambientales que no se cuantifican debido a la ausencia de estaciones de monitoreo.

Tabla IV. Evidencia científica nacional e internacional sobre los efectos en salud asociados a la exposición prolongada a PM_{2.5}

Año	País de procedencia	Tipo de estudio	Título del estudio (en español)	Principales hallazgos	DOI	Referencia	Conclusión
2018	China	Internacional	Asociación entre la exposición ambiental a PM _{2.5} y el riesgo de parto prematuro en China: un estudio de cohorte retrospectivo	La exposición a PM _{2.5} durante el embarazo aumenta el riesgo de parto prematuro, especialmente en el tercer trimestre.	10.1016/j.scitotenv.2018.03.328	Guo, T., et al. (2018). <i>Science of The Total Environment</i> , 633, 1443–1451.	La exposición prenatal a PM _{2.5} se asocia con efectos adversos reproductivos y mayor riesgo de parto prematuro, especialmente en ambientes urbanos con altos niveles de contaminación.
2019	Estados Unidos	Internacional	Exposición de cinco años a PM _{2.5} y ozono y aterosclerosis subclínica en mujeres de mediana edad (SWAN)	Exposición prolongada a PM _{2.5} (+1 µg/m³) aumenta el grosor íntima-media carotídeo (cIMT), marcador de aterosclerosis.	10.1016/j.ijheh.2018.09.001	Duan, C., Talbott, E., Brooks, M., Park, S. K., et al. (2019). <i>International Journal of Hygiene and Environmental Health</i> , 222(5), 846–855.	La exposición crónica a PM _{2.5} favorece la aterosclerosis subclínica, lo que sugiere un vínculo directo con enfermedades cardiovasculares en mujeres de mediana edad.
2019	Estados Unidos	Internacional	Efecto a largo plazo del material particulado fino sobre la hospitalización por demencia	En 13 millones de adultos mayores (EE. UU.), cada +1 µg/m³ anual de PM _{2.5} se asocia con mayor riesgo de hospitalización por demencia (HR 1,049).	10.1016/j.envpol.2019.07.094	Lee, M., Schwartz, J., Wang, Y., Dominici, F., & Zanobetti, A. (2019). <i>Environmental Pollution</i> , 254, 113010.	La exposición prolongada a PM _{2.5} puede acelerar el deterioro cognitivo y aumentar la incidencia de demencia, evidenciando riesgos neurológicos asociados a la contaminación atmosférica.
2024	Chile	Nacional	Exposición a corto plazo a la contaminación por material particulado fino y mortalidad en adultos mayores en Chile	Relación positiva entre aumentos de PM _{2.5} y mortalidad respiratoria y cardiovascular.	10.1038/s43247-024-01634-x	Busch, P., Rocha, P., Lee, K. J., et al. (2024). <i>Communications Earth & Environment</i> , 5, 469.	En Chile, los incrementos de PM _{2.5} están directamente relacionados con muertes respiratorias y cardiovasculares, afectando principalmente a adultos mayores.
2025	Chile	Nacional	Evaluación del impacto de la exposición a PM _{2.5} en el rendimiento académico de escolares chilenos	Reducción del rendimiento escolar con exposición prolongada.	10.3390/app15105474	González-Rojas, A., et al. (2025). <i>Applied Sciences</i> , 15(10), 5474.	La exposición crónica a PM _{2.5} impacta negativamente en el desarrollo cognitivo infantil, evidenciando un efecto transversal en la salud y educación de la población escolar.

Fuente: Elaboración propia en base a Busch et al. (2024); González-Rojas et al. (2025); Duan et al. (2019); Guo et al. (2018); Lee et al. (2019).

En síntesis, la evidencia recopilada confirma que la exposición a PM_{2.5}, incluso en concentraciones moderadas, está asociada a un aumento significativo de patologías respiratorias, cardiovasculares y neurodegenerativas. Esta información sustenta la relevancia de realizar mediciones locales que permitan evaluar los riesgos sanitarios en la ciudad de Constitución.

5.1.3 Estudios sobre emisiones de PM_{2.5} derivadas de la quema de leña

Dado que la calefacción residencial mediante leña húmeda es una de las principales fuentes de emisión en Constitución, la Tabla V reúne estudios que analizan los efectos toxicológicos y las características de emisión asociadas a la combustión de leña.

En todos los estudios revisados se observa que:

La humedad del combustible incrementa las emisiones de PM_{2.5} y compuestos tóxicos.

Las partículas ultrafinas generadas por la combustión de leña presentan efectos inflamatorios y genotóxicos en humanos.

La gestión ineficiente de las cenizas y la falta de tecnologías limpias aumentan la exposición comunitaria.

Estas conclusiones se alinean estrechamente con el patrón respiratorio invernal observado en la ciudad de Constitución, reforzando la urgencia de contar con monitoreo continuo que permita asociar episodios críticos con el comportamiento de la calefacción residencial.

Tabla V. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y efectos derivados de la quema de leña

Año	País de procedencia	Tipo de estudio	Tema del estudio	Principales hallazgos	DOI	Referencia	Conclusión
2017	Italia	Internacional	Toxicidad de partículas ultrafinas por quema de leña	En un pueblo alpino con calefacción a leña, las partículas ultrafinas (PUF, <100 nm) mostraron actividad proinflamatoria (↑ IL-8 en A549, THP-1 y sangre total) y genotoxicidad (daño ADN) con estacionalidad: verano ↑ IL-8; invierno ↑ genotoxicidad.	10.1016/j.scitotenv.2017.02.125	Corsini, E., Vecchi, R., Marabini, L., Fermo, P., et al. (2017). The chemical composition of ultrafine particles and associated biological effects at an alpine town impacted by wood burning. Science of The Total Environment.	Las PUF del humo de leña inducen inflamación pulmonar y daño genético dependiente de dosis y estación → urge control de combustión residencial.
2018	Chile	Nacional	Influencia de la humedad en emisiones de combustión de leña (Eucalyptus globulus)	En Eucalyptus globulus, pasar de 0 % a 25 % de humedad elevó el factor de emisión (FE) de PM _{2.5} ≈11,39x y el número total de partículas ≈4,2x; ↑ HAP en PM _{2.5} con leña húmeda. Ensayos en cámara de combustión controlada (3CE).	10.1016/j.scitotenv.2018.08.057	Guerrero, F., Yáñez, K., Vidal, V., & Cereceda-Balic, F. (2018). Effects of wood moisture on emission factors of PM _{2.5} , particle number and particulate-phase PAHs from Eucalyptus globulus combustion using a controlled emissions chamber. Science of The Total Environment.	Secar la leña importa: la humedad dispara PM _{2.5} , partículas y HAP → clave normar y fiscalizar HM ≤ 25 %, fomentar combustibles/tecnologías limpias.
2020	África (múltiples países)	Internacional	Composición tóxica de cenizas de leña en cocinas tradicionales africanas	Cenizas de leña de estufas tradicionales contienen metales tóxicos (As, Cd, Hg, Pb) y HAP; riesgo infantil por ingestión/dermal puede superar umbrales seguros. Mayor exposición: Ruanda > Burundi > Uganda > Nigeria.	10.1016/j.scitotenv.2020.141316	Etchie, A. T., Etchie, T. O., Elemile, O. O., Boladale, O., Oni, T., et al. (2020). Burn to kill: Wood ash a silent killer in Africa. Science of The Total Environment, 141316.	La gestión de cenizas es un problema sanitario → mejorar tecnologías de cocción, valorización de residuos y proteger salud infantil.

2021	Chile	Nacional	Contribución de la calefacción residencial a la contaminación por PM _{2.5}	En invierno, la quema residencial de leña fue la principal fuente de PM _{2.5} : Molina 62,9 % (≈41,55 µg/m ³) y Valdivia 51,7 % (≈43,65 µg/m ³). Con SOA por combustión ineficiente, el aporte total llegó a ≈83 % (Molina) y ≈81 % (Valdivia).	10.1016/j.apr.2021.02.011	Jorquera, H., Villalobos, A. M., & Schauer, J. J. (2021). Wood burning pollution in Chile: A tale of two mid-size cities. Atmospheric Pollution Research, 12(4), 101028.	Confirma que la calefacción domiciliar a leña domina la PM _{2.5} en el sur de Chile → eficiencia térmica y combustibles limpios son prioritarios.
------	-------	----------	---	--	---------------------------	--	--

Los resultados de los estudios revisados demuestran que la leña húmeda es una de las principales fuentes de emisión de PM_{2.5} y de compuestos tóxicos en territorios de clima frío. Esto coincide con las prácticas de calefacción residencial observadas en Constitución y justifica priorizar sectores residenciales para la implementación de estaciones de monitoreo.

5.1.4 Evidencia sobre emisiones industriales asociadas a la celulosa y papel

La Tabla VI resume estudios que analizan las emisiones de PM_{2.5} y gases tóxicos provenientes de la industria de la celulosa y papel, un sector presente en la actividad económica de Constitución.

Los estudios muestran que:

Las plantas industriales pueden generar episodios de contaminación significativos si no se implementan controles adecuados.

Las emisiones de PM_{2.5}, SO₂ y material orgánico volátil pueden extenderse a las zonas habitadas.

La falta de monitoreo continuo limita la capacidad para identificar riesgos y aplicar modelos de gestión.

Dado que Constitución cuenta con presencia industrial en su borde urbano, esta evidencia resulta directamente relevante para la propuesta de selección óptima de estaciones de monitoreo, donde una estación cercana al sector industrial permitiría cuantificar estos aportes.

Tabla VI. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y emisiones de PM_{2.5} asociadas a la industria de la celulosa y papel

Año	País de procedencia	Tipo de estudio	Tema del estudio	Principales hallazgos relacionados con PM _{2.5}	DOI	Referencia	Conclusión
2017	Canadá	Nacional	Estudio piloto sobre emisiones tóxicas del aire ambiente cerca de una planta kraft en el condado de Pictou, Nueva Escocia.	Se evaluaron contaminantes atmosféricos asociados a plantas de pulpa y papel kraft, detectándose concentraciones elevadas de compuestos orgánicos volátiles y correlaciones con vientos provenientes de la planta, vinculados a emisiones particuladas finas del proceso.	10.1007/s11356-017-9719-5	Hoffman, E. et al. (2017). Environmental Science and Pollution Research, 24, 20685–20698.	Evidencia de exposición comunitaria a contaminantes atmosféricos provenientes de plantas kraft y necesidad de fortalecer el monitoreo de calidad del aire.
2021	Canadá / EE.UU.	Transfronterizo	Impactos de la contaminación atmosférica proveniente de una planta de celulosa y papel ubicada en Edmundston (NB) y Madawaska (ME).	Se identificaron superaciones de las normas de calidad del aire por PM _{2.5} y SO ₂ entre 2010–2017, con falta de reporte binacional y de monitoreo independiente, generando riesgo respiratorio y	10.1016/j.envc.2021.100245	Dionne, J. & Walker, T.R. (2021). Environmental Challenges, 5, 100245.	Las plantas transfronterizas generan emisiones significativas de PM _{2.5} y SO ₂ ; se recomienda cooperación binacional y modernización tecnológica.

				cardiovascular en comunidades aledañas.			
2022	Canadá	Regional	Caracterización de emisiones atmosféricas reportadas por fábricas de pulpa y papel del Atlántico canadiense (2002–2019).	Los registros oficiales revelan emisiones de PM _{2.5} hasta 100 000 % superiores al umbral federal (0,3 t/año). Northern Pulp se identificó como el principal emisor regional.	10.3390/pollutants2020011	Giacosa, G. et al. (2022). Pollutants, 2(2), 135–155.	Se evidencian emisiones extremas de PM _{2.5} en el sector; urge establecer límites coercitivos y fiscalización ambiental estricta.
2022	Chile	Nacional	Inventario nacional de emisiones y gases de efecto invernadero (INEMA) con resolución de 1 km.	Se estimó que más del 90 % de las emisiones de PM _{2.5} en Chile provienen del sector residencial (leña), aunque el sector industrial —incluyendo celulosa y papel— representa una fuente relevante de SO ₂ y CO ₂ en zonas específicas.	10.5194/essd-14-361-2022	Álamos, N. et al. (2022). Earth System Science Data, 14, 361–379.	El estudio establece la magnitud de las fuentes nacionales de PM _{2.5} y refuerza la necesidad de medidas sectoriales integradas en energía e industria.
2024	Chile	Evaluación de ciclo de vida	Evaluación ambiental de la producción de pulpa blanqueada de eucalipto mediante el proceso Kraft.	Se identificó que la etapa industrial concentra el 88 % del impacto ambiental, con emisiones de CO ₂ fósil (784 kg CO ₂ eq/t) y gases precursores de material particulado (NO _x , SO ₂) originados en hornos y calderas.	10.3390/su16219236	Carvalho, A. & Vega-Coloma, M. (2024). Sustainability, 16(21), 9236.	El estudio evidencia que la producción industrial de celulosa es una fuente relevante de emisiones atmosféricas y plantea estrategias de eficiencia energética y mitigación.

La evidencia internacional y nacional muestra que las plantas industriales pueden generar emisiones relevantes de PM_{2.5} y gases tóxicos, por lo que su cercanía a zonas habitadas constituye un riesgo potencial. Esto respalda la necesidad de incluir una estación de monitoreo en el borde industrial oriente de Constitución.

5.1.5 Emisiones vehiculares y su contribución al PM_{2.5} urbano

Las fuentes móviles representan otra contribución importante al material particulado, especialmente en zonas con tránsito moderado y en calles angostas, como el centro de Constitución. La Tabla VII integra estudios que caracterizan las emisiones vehiculares en distintos contextos urbanos.

Los principales hallazgos muestran que:

- Los vehículos diésel generan altos niveles de PM_{2.5} y PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos).
- El desgaste de frenos y neumáticos también aporta partículas finas de manera significativa.
- La salud pública se ve afectada especialmente en áreas de alta densidad urbana y en escuelas cercanas a vías principales.

Esta evidencia complementa los datos locales que muestran un aumento de patologías respiratorias y refuerza la necesidad de ubicar estaciones de monitoreo en sectores con mayor flujo vehicular.

Tabla VII. Estudios científicos sobre contaminación atmosférica y emisiones de PM_{2.5} asociadas a fuentes móviles (vehículos)

Año	País de procedencia	Tipo de estudio	Tema del estudio	Principales hallazgos	DOI	Referencia	Conclusión
2015	Suecia	Observacional urbano	Concentrations and emission factors for PM _{2.5} and PM ₁₀ from road traffic in Sweden	PM _{2.5} promedio: $8 \pm 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gotemburgo y $7 \pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Umeå ($\approx 20\text{--}55\%$ sobre fondo urbano). Factores de emisión promedio: PM ₁₀ = $0.06 \text{ g km}^{-1} \text{ veh}^{-1}$, PM _{2.5} = $0.02 \text{ g km}^{-1} \text{ veh}^{-1}$. El desgaste vial (neumáticos con clavos) aporta $< 1\%$ de PM _{2.5-10} .	10.1016/j.atmosenv.2015.08.037	Fern, M. & Sjöberg, K. (2015). Atmospheric Environment, 122, 175–186.	La mayor fracción de PM _{2.5} proviene de emisiones de escape, mientras que la resuspensión y desgaste influyen en PM ₁₀ . La gestión del polvo vial y del uso de neumáticos con clavos es clave.
2021	Taiwán	Experimental (muestreo en túnel vehicular)	Characterization of PM _{2.5} and Particulate PAHs Emitted from Vehicles via Tunnel Sampling in Different Time Frames	PM _{2.5} promedio: $21.9 \pm 6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (entrada) y $46.1 \pm 12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (salida). Mayor carga de PAHs de 4 anillos; BcFE domina el BaP-TEQ (63–93 %). Días hábiles y periodos diurnos muestran emisiones más altas por tráfico diésel.	10.4209/aaqr.210074	Wang, W.-C., Dat, N.D., Chi, K.-H., & Chang, M.-B. (2021). Aerosol and Air Quality Research, 21(10), 210074.	El estudio demuestra que las flotas diésel y los patrones de tráfico influyen fuertemente en PM _{2.5} y PAHs; se recomiendan controles específicos en horas pico.
2024	China	Modelación multirregional (salud y economía)	Characteristics of Emissions and Health Effects of PM _{2.5} from Vehicles in Typical Urban Agglomerations	Emisiones de PM _{2.5} de vehículos (2010–2020): tendencia inicial ascendente y luego descenso. Principales emisores: camiones y buses pesados. Estimadas 78.200 muertes prematuras y 300 mil millones CNY en pérdidas sanitarias ($\approx 1,2\%$ del PIB urbano).	10.3389/fpubh.2024.1326659	Song, X. & Hao, Y. (2024). Frontiers in Public Health, 12, 1326659.	Las emisiones vehiculares siguen siendo un riesgo sanitario y económico crítico; urge endurecer la regulación y el control del transporte pesado.

Nota: La tabla resume estudios científicos relevantes sobre contaminación atmosférica y emisiones de material particulado fino (PM_{2.5}) asociadas a fuentes móviles (vehículos), considerando distintos enfoques metodológicos, contextos geográficos y principales conclusiones reportadas en la literatura especializada.

Los estudios analizados confirman que las fuentes móviles aportan de manera significativa al PM_{2.5} urbano, especialmente en zonas con alto flujo vehicular. En la ciudad de Constitución, esta información justifica la instalación de una estación en el eje vial principal del centro urbano.

En conjunto, la evidencia científica revisada demuestra que las fuentes residenciales, industriales y vehiculares pueden contribuir simultáneamente a la concentración de PM_{2.5} en ciudades intermedias como Constitución. La ausencia de monitoreo local impide cuantificar estas contribuciones y limita la capacidad de evaluar riesgos reales para la salud pública. Por ello, los resultados aquí presentados constituyen la base científica que sustenta la propuesta de red de monitoreo desarrollada en las siguientes secciones.

5.2 Resultados del catastro territorial y diagnóstico espacial

5.2.1 Zonificación física y condiciones territoriales

El análisis espacial desarrollado para la comuna de Constitución permitió identificar patrones físico-territoriales que influyen directamente en la concentración y dispersión del material particulado fino ($PM_{2.5}$). La topografía costera y la variabilidad morfológica del relieve comunal generan microambientes con comportamientos diferenciados en cuanto a la ventilación, la acumulación de contaminantes y la exposición poblacional, lo cual resulta clave para la selección estratégica de emplazamientos para futuras estaciones de monitoreo.

En términos generales, el centro urbano y el borde costero se ubican en zonas de menor altitud, donde la ventilación natural es limitada durante los meses fríos. Esta condición, combinada con la morfología en depresión del área urbana, favorece la acumulación de humo proveniente de calefacción residencial y emisiones vehiculares. Se observan, además, corredores viales angostos con efecto cañón urbano, que reducen aún más la dispersión de contaminantes atmosféricos.

Por el contrario, los sectores suroriente y periurbanos ubicados en zonas más elevadas presentan una morfología irregular, con pendientes moderadas y exposición variable a los vientos predominantes del suroeste. Sin embargo, pese a su mejor ventilación relativa, estos sectores presentan un uso intensivo de leña húmeda debido a la menor eficiencia térmica de las viviendas, lo que incrementa su potencial de emisión. En estas áreas se combinan factores de emisión alta con una mayor vulnerabilidad socioambiental, lo que las convierte en zonas prioritarias para el monitoreo.

La orientación del relieve también desempeña un rol importante: los sectores orientados al este y al sureste tienden a presentar menor ventilación durante el invierno, lo cual coincide con áreas residenciales de rápido crecimiento y alta densidad habitacional. Estas condiciones incrementan la probabilidad de acumulación de material particulado fino, especialmente en días de baja presión o inversión térmica costera, fenómeno frecuente en la comuna.

La Tabla VIII sintetiza las variables utilizadas para la zonificación territorial y su implicancia ambiental. Esta clasificación permitió identificar áreas con mayor riesgo de acumulación de $PM_{2.5}$, lo que contribuyó al diseño del modelo multicriterio aplicado posteriormente en la propuesta de red de monitoreo.

En conjunto, los resultados de la zonificación física evidencian que Constitución presenta condiciones territoriales que favorecen la formación de “bolsas de contaminación”, especialmente en zonas bajas y densamente pobladas. La integración de estas variables permite comprender la distribución espacial del riesgo y fundamenta técnicamente la necesidad de contar con estaciones de monitoreo que representen adecuadamente la diversidad geográfica y socioambiental del territorio.

Tabla VIII. Variables espaciales utilizadas en el diagnóstico territorial

Variable	Clasificación aplicada	Implicancia ambiental
Altitud	Baja, media y alta	Zonas bajas acumulan $PM_{2.5}$
Pendiente	Baja, media y alta	Influye en circulación del aire
Orientación	Según dirección de viento	Sectores con ventilación limitada
Densidad poblacional	Baja, media y alta	Define exposición potencial

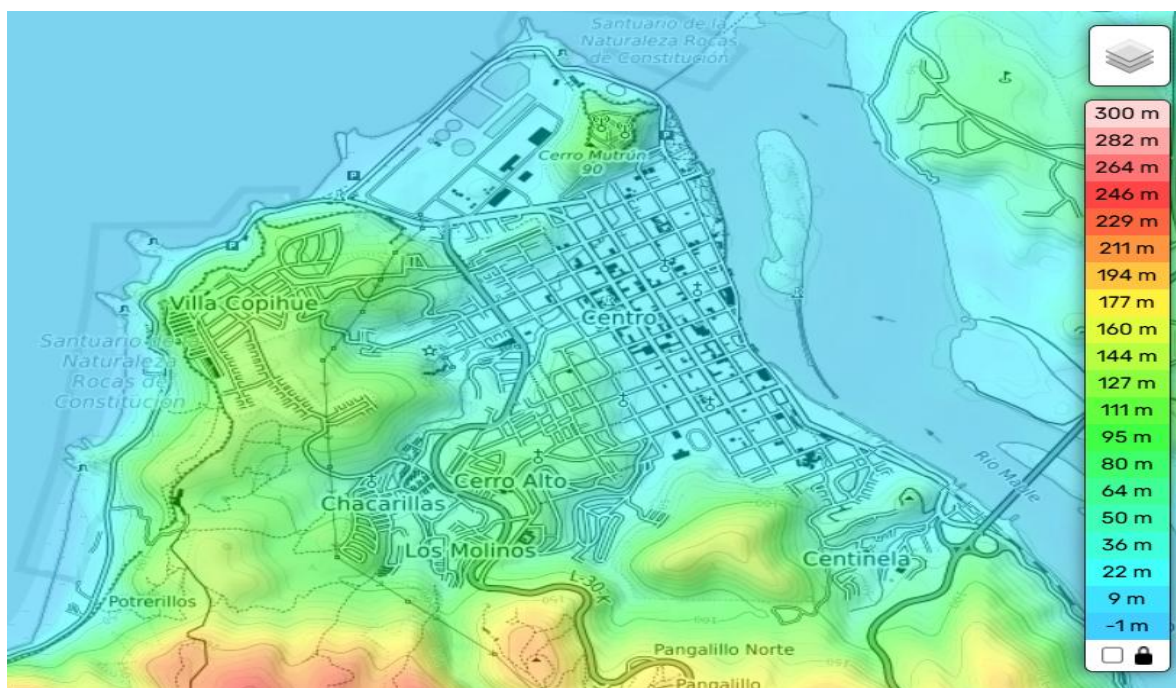


Figura 5.: Zonificación altitudinal de la ciudad de Constitución. Se representan las áreas bajas, medias y altas en base a un modelo topográfico. Fuente: Topographic-map.com (2025).

La figura representa las áreas bajas, medias y altas del territorio comunal, lo que permite identificar sectores con mayor susceptibilidad a la acumulación de material particulado fino debido a condiciones de ventilación reducida. Las áreas urbanas de menor altitud — particularmente el centro, Villa Copihue y los sectores cercanos al borde costero— presentan una mayor propensión a retener contaminantes durante los meses fríos. Por el contrario, zonas elevadas del suroriente, como Chacarillas y Los Molinos, presentan una morfología más irregular y una mayor exposición a los vientos predominantes, lo que favorece la dispersión atmosférica. Esta distribución altitudinal constituye un insumo clave para el modelo multicriterio aplicado a la propuesta de ubicación óptima de estaciones de monitoreo de $PM_{2.5}$ en la comuna.

5.2.2 Caracterización habitacional según Censo 2024

Con el propósito de complementar el diagnóstico territorial, se incorporó información del Censo de Población y Vivienda 2024 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), relativa a la distribución de viviendas particulares ocupadas con moradores en la comuna de Constitución. Esta caracterización es relevante, ya que los tipos de vivienda y sus condiciones constructivas influyen directamente en los patrones de calefacción residencial y, en consecuencia, en la generación de emisiones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) durante la temporada invernal.

La comuna presenta un total de 17.374 viviendas particulares habitadas, en las que predomina ampliamente la vivienda unifamiliar con acceso directo desde la calle (70,9 %). Asimismo, destacan los 4.418 departamentos ubicados en edificios sin ascensor, que corresponden a zonas de mayor densificación urbana y de mayor potencial de acumulación de contaminantes atmosféricos debido a una ventilación limitada. El resto de las tipologías habitacionales presenta valores considerablemente menores, aunque su presencia sigue siendo relevante al analizar la vulnerabilidad térmica y la dependencia energética de ciertos sectores de la población.

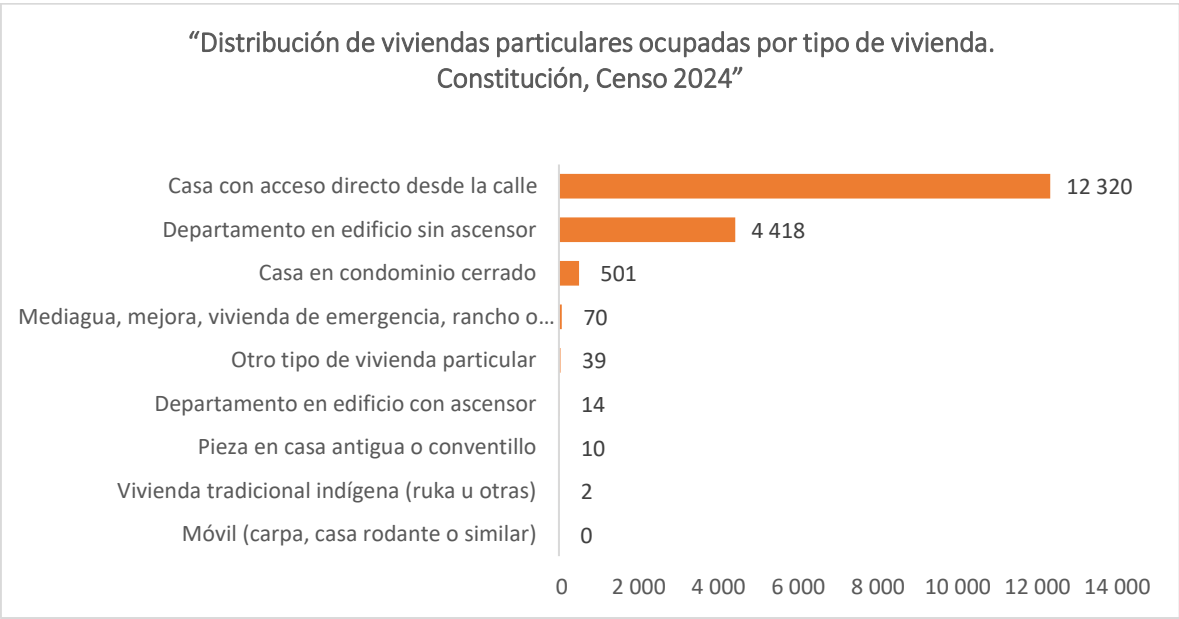


Figura 6. Distribución de viviendas particulares ocupadas por tipo de vivienda en Constitución (Censo 2024). Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Censo de Población y Vivienda 2024. Elaboración propia.

5.2.3 Identificación de fuentes emisoras: evidencia visual

El catastro de campo complementó el análisis espacial mediante evidencia visual georreferenciada. Las observaciones registraron emisiones significativas asociadas al uso de leña húmeda en sectores residenciales de alta densidad y en zonas periurbanas de la comuna. Del mismo modo, se identificaron fuentes industriales puntuales localizadas en el sector oriente y aportes de fuentes móviles asociados a los principales accesos viales.

Tabla IX. Catastro de fuentes emisoras según evidencia visual georreferenciada

Tipo de fuente	Descripción observada	Ubicación aproximada	Intensidad estimada
Residencial	Emisiones domiciliarias persistentes	Centro–Sur / Periferia	Alta
Industrial	Emisiones puntuales por combustión	Sector oriente	Media
Vehicular	Flujo continuo en accesos principales	Rutas internas y de conexión	Media

Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Distribución socioambiental del riesgo

El análisis del Índice Socioeconómico comunal evidenció una clara desigualdad territorial: los sectores con menor nivel socioeconómico coinciden con áreas donde se reporta un mayor uso de leña como fuente de calefacción, viviendas de menor eficiencia térmica y mayor exposición a contaminantes. Esta condición incrementa el riesgo ambiental y sanitario para grupos vulnerables, lo que reforza la necesidad de instalar estaciones en sectores donde actualmente no existe ningún mecanismo de medición.

Tabla X. Distribución socioambiental del riesgo

Sector comunal	Índice Socioeconómico	Uso estimado de leña	Nivel de vulnerabilidad
Centro urbano	0,70–0,77	Medio	Medio
Suroriente	0,53–0,60	Alto	Alto
Sectores rurales	0,55–0,62	Alto	Alto

Fuente: Elaboración propia

5.2.5 Tendencia de urgencias respiratorias (2019–2025)

El análisis de los registros oficiales proporcionados por la SEREMI de Salud del Maule evidencia variaciones significativas en la demanda sanitaria respiratoria durante el período 2019–2025. Estos datos permiten contextualizar la evolución de los problemas respiratorios asociados a la exposición a material particulado fino (PM_{2.5}) en la comuna de Constitución, especialmente considerando la ausencia de estaciones de monitoreo atmosférico en el territorio.

Los resultados muestran tres patrones claramente diferenciados. El año 2019 presenta un nivel elevado de urgencias respiratorias (11.507 casos), lo que es representativo del comportamiento habitual prepandemia en territorios donde el uso de leña húmeda es la principal fuente de calefacción durante el invierno. En contraste, durante 2020 y 2021 se observa una disminución abrupta (2.542 y 3.032 casos, respectivamente), atribuible a las medidas de restricción de movilidad y uso masivo de mascarillas implementadas por la pandemia de COVID-19, que redujeron la circulación de virus respiratorios y la exposición comunitaria a material particulado.

A partir del año 2022, la demanda respiratoria muestra un incremento sostenido, alcanzando 12.611 casos, una cifra similar a los niveles observados antes de la pandemia. Este aumento se intensifica en 2023, cuando se registran 12.385 urgencias respiratorias, coincidiendo con los episodios de incendios forestales e industriales que afectaron la región y que aumentaron significativamente la concentración de PM_{2.5} en zonas costeras y urbanas. Durante 2024 y 2025, la tendencia continúa al alza, alcanzando en 2025 el valor máximo de la serie (18.671 casos), lo que evidencia una vulnerabilidad sanitaria creciente frente a episodios de contaminación atmosférica.

En conjunto, los resultados demuestran una relación estrecha entre la calidad del aire y la carga respiratoria regional, lo que reforzó la necesidad de implementar una red local de monitoreo de PM_{2.5} en Constitución que permita correlacionar con precisión las variaciones en la concentración de contaminantes y sus efectos en la salud pública.

Tabla XI. Tendencia anual de urgencias totales y respiratorias en la Región del Maule (2019–2025).

Año	Urgencias Totales	Urgencias Respiratorias
2019	60412	11507
2020	41092	2542
2021	46805	3032
2022	62610	12611
2023	51311	12385
2024	57525	16876
2025	67581	18671

Fuente: Elaboración propia

La tabla presenta la evolución de la demanda de atenciones de urgencia y de urgencias respiratorias durante siete años consecutivos, lo que evidencia el impacto sanitario generado por episodios críticos de contaminación atmosférica y por condiciones ambientales adversas en la región del Maule.

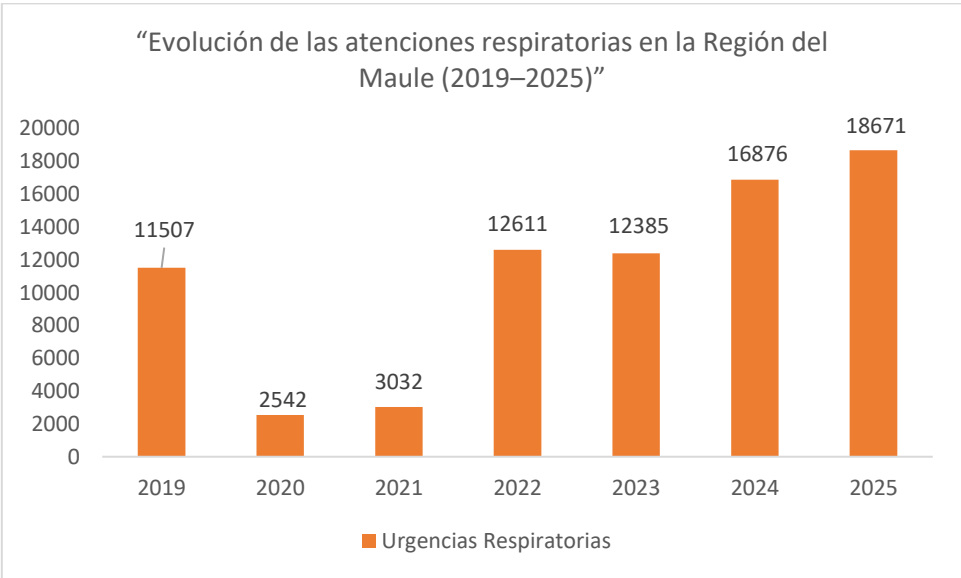


Figura 7. Evolución de las atenciones respiratorias en la Región del Maule (2019–2025). Fuente: SEREMI de Salud del Maule (2025). Datos obtenidos vía la Ley de Transparencia, Solicitud AO047T0002860. Elaboración propia.

5.2.6 Desagregación de causas respiratorias atendidas en urgencias en la comuna de Constitución (2019–2025)

El análisis detallado de las causas respiratorias atendidas en los distintos centros asistenciales de la comuna de Constitución (hospital, SAPU y servicios de urgencia rurales), permite caracterizar con mayor precisión la carga sanitaria asociada a los episodios ambientales que afectan al territorio. Esta desagregación resulta fundamental para comprender el impacto de la calidad del aire en la salud de la población local, especialmente considerando que la comuna no cuenta con una estación oficial de monitoreo de $PM_{2.5}$, lo que dificulta la evaluación objetiva de la exposición real de sus habitantes.

La Tabla XII muestra la variación anual de las principales patologías respiratorias atendidas entre 2019 y 2025. Se observa que la Infección Respiratoria Aguda Alta (IRA Alta, J00–J06) constituye de forma constante la mayor proporción de atenciones respiratorias en la comuna. Los incrementos más acentuados ocurren en los años 2022, 2024 y 2025, periodos coincidentes con eventos ambientales relevantes en Constitución, tales como la intensificación del uso de calefacción a leña, condiciones meteorológicas de baja ventilación costera e incendios forestales de gran extensión que generaron material particulado fino transportado hacia la zona urbana.

De manera similar, las atenciones por bronquitis y bronquiolitis aguda (J20–J21) muestran un aumento marcado en 2023–2025, duplicándose respecto de los valores observados previos a la pandemia. Estas patologías son particularmente sensibles a la presencia de partículas finas ($PM_{2.5}$), por lo que su incremento sostenido constituye un indicador indirecto del deterioro de la calidad del aire en la comuna.

Otras patologías, como la neumonía (J12–J18), presentan aumentos significativos en 2023 y 2024, coincidiendo con los meses de mayor estabilidad atmosférica y mayor uso de la combustión residencial. La recurrencia de estos patrones sugiere que Constitución experimenta episodios críticos de contaminación que no se cuantifican debido a la ausencia de un sistema de monitoreo local.

Los casos de COVID-19 registrados en los dispositivos de urgencia de Constitución no se incorporan al subtotal “Total causas sistema respiratorio”, ya que, por normativa epidemiológica del MINSAL, se clasifican fuera del capítulo J del CIE-10 y poseen una vigilancia independiente. Aunque clínicamente afectan al sistema respiratorio, su inclusión distorsionaría el análisis de las enfermedades respiratorias asociadas a factores ambientales. Por ello, en este estudio se presentan por separado, siguiendo la metodología oficial.

En conjunto, la evolución de estas patologías respiratorias evidencia una tendencia creciente que no puede explicarse únicamente por ciclos estacionales o virales, sino que se relaciona con la exposición prolongada de la población a contaminantes atmosféricos. Esta situación reviste especial importancia en la Constitución, donde la inexistencia de una estación de monitoreo impide identificar y cuantificar los episodios críticos de calidad del aire. Los resultados sanitarios analizados refuerzan la necesidad de instalar una estación de medición de $PM_{2.5}$ en la comuna, que respalde decisiones ambientales, prevea riesgos para la salud y genere políticas locales basadas en evidencia.

Tabla XII. Causas respiratorias atendidas en los centros de urgencia de la comuna de Constitución (2019–2025).

Enfermedad Respiratoria	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
IRA ALTA	8645	1975	2283	10032	8668	11269	11913
Influenza	23	7	51	25	23	38	123
Neumonía	856	168	104	533	844	1130	1172
Bronquitis / bronquiolitis aguda	1477	147	190	1284	1998	3652	4622
Crisis obstructiva bronquial	377	118	126	388	451	376	419
Otra causa respiratoria	129	127	278	349	401	411	422
Total, causas sistema respiratorio	11507	2542	3032	12611	12385	16876	18671
COVID 19 Sospechoso	-	3734	8600	9321	1241	9	4
COVID 19 Confirmado	-	69	521	962	496	137	1

Nota: En 2019 no existía la clasificación COVID-19, motivo por el cual no se registran casos.

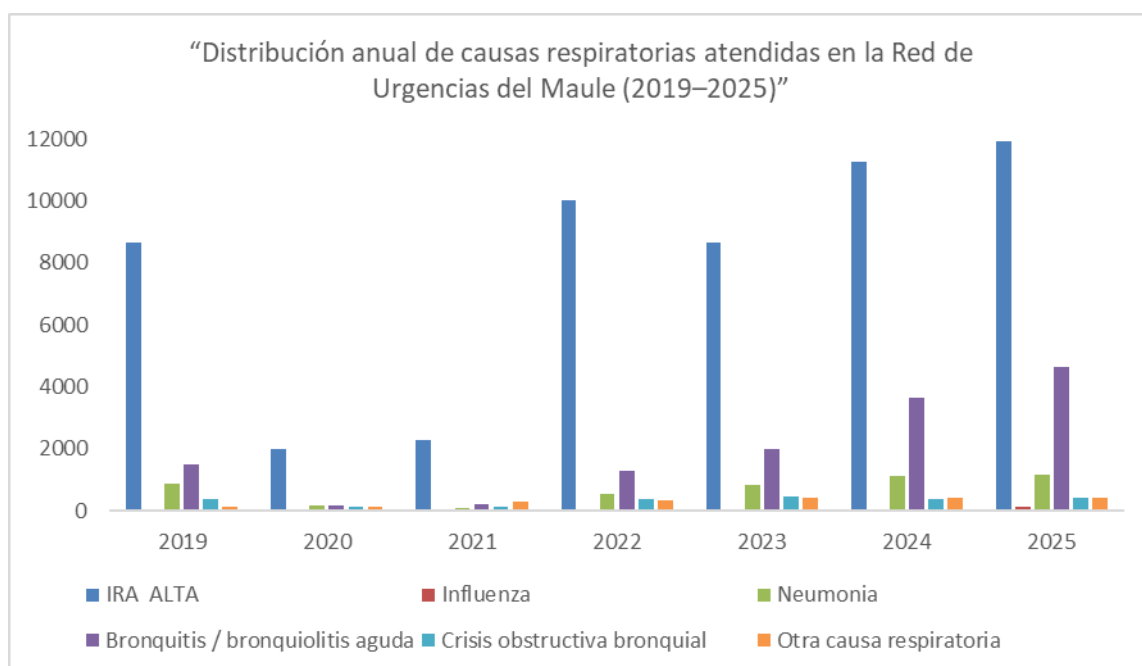


Figura 8. Distribución anual de causas respiratorias en los centros de urgencia de Constitución (2019–2025). Fuente: SEREMI de Salud del Maule (2025). Datos solicitados vía Ley de Transparencia (AO047T0002860). Elaboración propia.

Nota al pie: “COVID-19 se reporta de manera separada según clasificación CIE-10 (U07.1–U07.2)”

Estos resultados evidencian que la carga de enfermedad respiratoria en la ciudad de Constitución mantiene una tendencia ascendente en los últimos años, con incrementos que coinciden temporalmente con eventos ambientales críticos (uso intensivo de calefacción a leña, incendios forestales e inversiones térmicas). La ausencia de un sistema de monitoreo atmosférico impide cuantificar esta relación de manera directa, lo que refuerza la necesidad de instalar estaciones de medición como herramienta preventiva y de gestión de la salud

pública. La evolución creciente de estas patologías, sumada a la falta de registros locales sobre la calidad del aire, constituye una brecha crítica en la vigilancia ambiental y sanitaria de la ciudad.

5.2.7 Comportamiento estacional de las atenciones respiratorias en la ciudad de Constitución (2019–2025)

Con el fin de profundizar en la dinámica temporal de las enfermedades respiratorias en la ciudad de Constitución, se realizó una desagregación mensual de las atenciones registradas entre 2019 y 2025, utilizando los datos proporcionados por la SEREMI de Salud del Maule. Esta desagregación permite identificar patrones estacionales que no son visibles en el análisis anual y resultan relevantes para comprender la relación entre la contaminación atmosférica y la carga sanitaria local.

Los resultados, presentados en la Tabla XIII, evidencian un comportamiento estacional marcado, en el que los meses de invierno —principalmente mayo, junio, julio y agosto— concentran la mayor demanda respiratoria en prácticamente todos los años analizados. Este comportamiento coincide con el periodo de mayor uso de la calefacción a leña húmeda y con condiciones meteorológicas de escasa ventilación costera, factores que incrementan la concentración de material particulado fino (PM_{2.5}) en zonas urbanas de la ciudad de Constitución.

Asimismo, la tendencia muestra que, tras la disminución excepcional observada durante la pandemia (2020–2021), las atenciones respiratorias aumentan de manera sostenida a partir de 2022, alcanzando sus máximos en 2024 y 2025. Este incremento es coherente con los episodios ambientales documentados en la ciudad de Constitución, como incendios forestales e industriales, así como el uso intensivo de combustible residencial durante los meses fríos.

Tabla XIII. Atenciones respiratorias mensuales registradas en los centros de urgencia de la ciudad de Constitución (2019–2025).

Mes	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Enero	534	326	91	378	440	658	604
Febrero	418	377	76	294	368	500	419
Marzo	974	824	179	435	947	1069	1226
Abril	1007	142	189	617	1038	1093	1111
Mayo	1119	88	90	1177	1647	2625	1703
Junio	1752	86	191	1591	1497	1538	1855
Julio	960	42	159	918	618	901	1351
Agosto	919	62	233	1606	1112	1914	2353
Septiembre	903	76	289	923	1045	1606	1923
Octubre	1108	105	392	1288	1307	1662	3064
Noviembre	1103	215	725	2291	1445	2017	3005
Diciembre	710	199	418	1093	921	1293	57
Total	11507	2542	3032	12611	12385	16876	18671

Fuente: SEREMI de Salud del Maule (2025). Datos solicitados vía Ley de Transparencia (AO047T0002860). Elaboración propia.

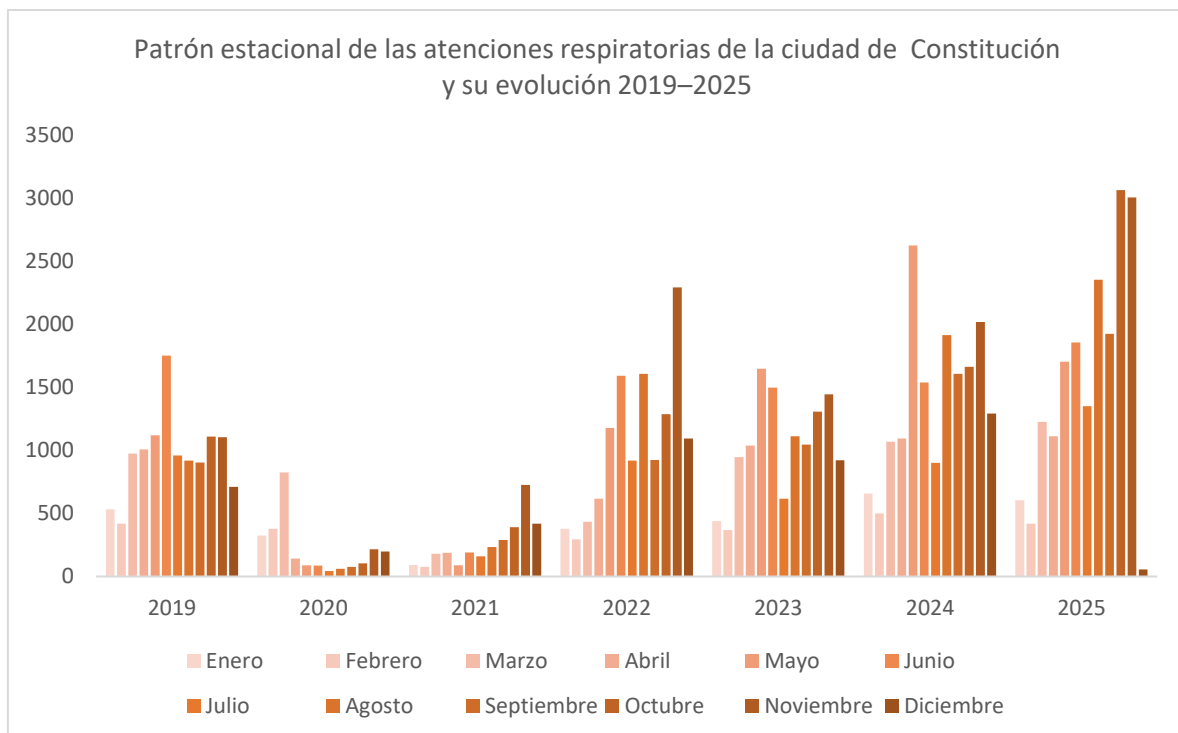


Figura 9. Evolución de las atenciones respiratorias mensuales en la ciudad de Constitución (2019–2025).. Fuente: SEREMI de Salud del Maule (2025). Elaboración propia. Fuente: SEREMI de Salud del Maule (2025). Elaboración propia.

La Figura 9 muestra gráficamente esta evolución mensual. Se observa un patrón consistente en que los picos de atención se concentran entre finales de otoño y mediados de invierno, con un aumento progresivo de la magnitud de estos picos hacia 2024 y 2025. Este comportamiento sugiere una intensificación de la exposición comunitaria a factores ambientales que afectan el sistema respiratorio, particularmente la contaminación por $PM_{2.5}$ y la ocurrencia de incendios de alta carga de combustión en la ciudad de Constitución.

Esto permite visualizar un patrón estacional claro en la ciudad de Constitución, donde las atenciones respiratorias aumentan significativamente durante los meses de invierno, alcanzando sus máximos entre mayo y agosto. A partir de 2022 se observa un ascenso sostenido en la magnitud de estos picos, destacando los años 2024 y 2025 como los de mayor carga respiratoria del período analizado. Este comportamiento refuerza la necesidad de contar con un sistema local de monitoreo de $PM_{2.5}$ que permita caracterizar los episodios críticos que afectan la salud de la población.

5.2.8 Identificación de fuentes emisoras episódicas: incendios forestales

Como parte de los resultados del catastro territorial de fuentes emisoras de material particulado fino ($PM_{2.5}$) en la ciudad de Constitución, se identifican no solo fuentes permanentes asociadas a la calefacción residencial, la actividad industrial y el tránsito vehicular, sino también fuentes emisoras de carácter episódico, entre las cuales destacan los incendios forestales.

Estos eventos fueron considerados dentro del catastro debido a su capacidad de generar emisiones intensas y concentradas de $PM_{2.5}$ en cortos períodos de tiempo, afectando de manera transitoria pero significativa la calidad del aire urbano y periurbano. En este contexto, se analizó la información oficial sobre la ocurrencia de incendios forestales y la superficie total afectada en la ciudad de Constitución para el período 2014–2024, con el objetivo de caracterizar su recurrencia y magnitud como parte del diagnóstico de fuentes emisoras. En la Tabla XIV se presenta la ocurrencia anual de incendios forestales y la superficie total afectada en la comuna de Constitución durante el período 2014–2024.

Tabla XIV Ocurrencia de incendios forestales y superficie total afectada identificadas en el catastro de fuentes emisoras episódicas de la ciudad de Constitución (2014–2024)

AÑOS	NUMERO INCENDIOS	TOTAL, SUPERFICIE AFECTADA (ha)
2014-2015	34	33,60
2015-2016	43	28,71
2016-2017	66	158,43
2017-2018	26	7,40
2018-2019	32	17,52
2019-2020	66	186,32
2020-2021	33	20,26
2021-2022	68	42,31
2022-2023	39	121,41
2023-2024	48	67,59

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), Resumen de ocurrencia y daño por comuna 1985–2023.

Los resultados evidencian una recurrencia sostenida de incendios forestales en la comuna durante la última década, con variaciones interanuales tanto en el número de eventos como en la superficie total afectada. Asimismo, se identifican temporadas de mayor severidad, caracterizadas por extensas áreas comprometidas, lo que sugiere una mayor carga potencial de emisiones de material particulado fino a la atmósfera.

Con el fin de visualizar de manera integrada la evolución temporal de estos eventos, se elaboró el gráfico que se presenta a continuación.

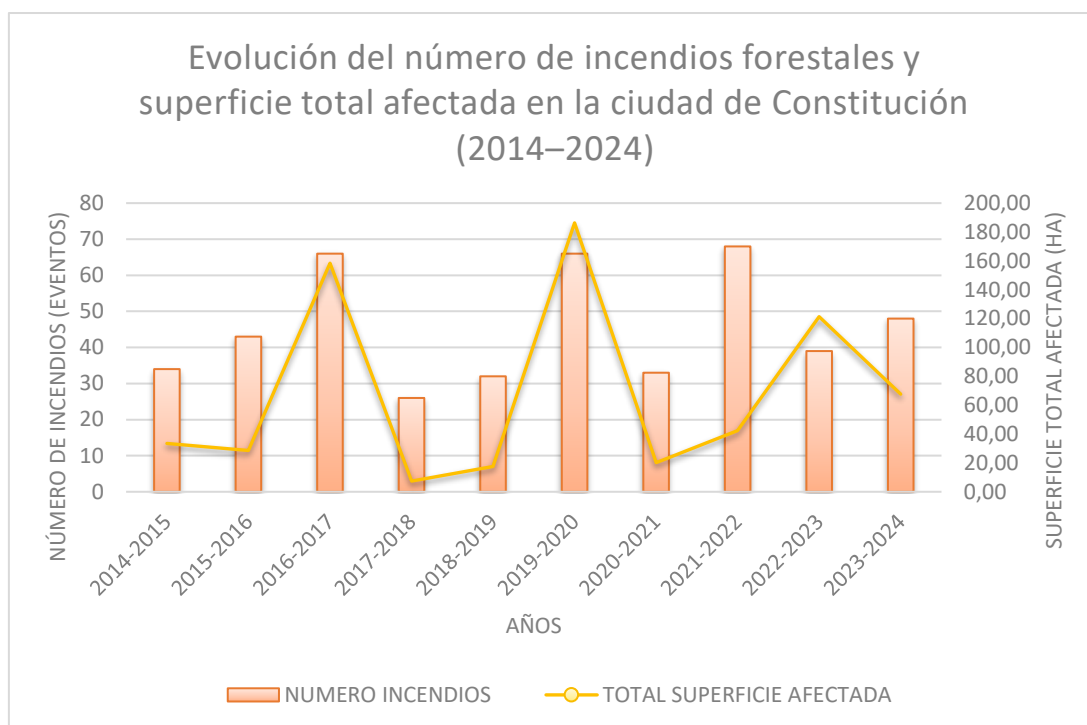


Figura 10. Evolución del número de incendios forestales y superficie total afectada identificados en el catastro de fuentes emisoras episódicas de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Constitución (2014–2024)

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), Resumen de ocurrencia y daño por comuna 2014–2024.

El análisis gráfico de la figura 10 muestra que, si bien la frecuencia de incendios fluctúa a lo largo del período analizado, existen temporadas de alta severidad, destacándose los años 2016–2017, 2019–2020 y 2022–2023, en los cuales la superficie afectada alcanza valores significativamente superiores al promedio. Estos eventos fueron incorporados en el catastro como fuentes emisoras episódicas relevantes, debido a su potencial para generar incrementos abruptos de $PM_{2.5}$ que no son capturados por fuentes permanentes.

Desde la perspectiva del presente estudio, la identificación de los incendios forestales como parte del catastro de fuentes emisoras contribuye a comprender la complejidad del problema ambiental en la ciudad de Constitución y refuerza la necesidad de considerar estaciones de monitoreo capaces de registrar tanto emisiones continuas como eventos críticos de corta duración, insumo fundamental para la posterior propuesta de red de monitoreo.

5.2.8.1. Evento reciente de incendio urbano-forestal ocurrido durante el año 2025

Como complemento al análisis histórico de incendios forestales en la comuna, durante el período de desarrollo de la presente investigación se registró un incendio de gran magnitud ocurrido en el área urbana y periurbana de la ciudad de Constitución en el año 2025. Este evento afectó sectores colindantes con zonas habitadas, generando una columna de humo visible de alta densidad y una afectación directa sobre la calidad del aire local, según registros fotográficos y audiovisuales obtenidos en terreno.

El incendio fue ampliamente documentado por medios de comunicación locales y regionales y motivó la intervención de organismos de emergencia y del Ministerio Público para la investigación de sus causas. Si bien la presente investigación no aborda la determinación de responsabilidades ni la intencionalidad del evento, su ocurrencia constituye un antecedente relevante desde el punto de vista ambiental, al evidenciar la recurrencia y proximidad de fuentes emisoras episódicas de material particulado fino ($PM_{2,5}$) en sectores habitados de la comuna.

Las imágenes registradas durante el evento muestran una alta opacidad del humo y una afectación visible del entorno urbano, lo que sugiere concentraciones elevadas de material particulado fino durante el episodio. Este tipo de emisiones, aunque de carácter transitorio, puede generar incrementos abruptos en la exposición poblacional, especialmente en comunidades vulnerables y en sectores con limitada ventilación atmosférica, como los identificados previamente en el diagnóstico territorial.

La ocurrencia de este incendio reciente refuerza los resultados obtenidos en el catastro de fuentes emisoras episódicas y confirma que los incendios forestales y de interfaz urbano-forestal representan un componente relevante del riesgo ambiental en la ciudad de Constitución. Asimismo, pone de manifiesto la necesidad de contar con estaciones de monitoreo de $PM_{2,5}$ capaces de registrar tanto emisiones continuas como episodios críticos de corta duración, que actualmente no pueden cuantificarse debido a la ausencia de sistemas de medición atmosférica en la comuna.

Desde una perspectiva de gestión ambiental y salud pública, este tipo de eventos subraya la urgencia de avanzar en la implementación de sistemas locales de monitoreo que permitan caracterizar la magnitud real de la exposición, apoyar la toma de decisiones preventivas y fortalecer los mecanismos de alerta temprana frente a episodios de contaminación aguda.

5.3 Resultados del modelo multicriterio y propuesta de red de monitoreo

5.3.1 Definición de aptitud ambiental para el monitoreo de $MP_{2,5}$

En el contexto de este estudio, el concepto de aptitud ambiental se refiere al grado en que un sector del territorio presenta condiciones favorables para la instalación de estaciones de monitoreo de material particulado fino ($MP_{2,5}$), considerando la representatividad de la exposición poblacional, la influencia de las fuentes emisoras, las características físicas del entorno y la utilidad de la información generada para la gestión ambiental y sanitaria.

La aptitud ambiental no implica niveles medidos de contaminación, sino una evaluación integrada del territorio, basada en criterios espaciales y ambientales, que permite identificar zonas estratégicas para el monitoreo. En este sentido, áreas con alta aptitud corresponden a sectores donde la instalación de estaciones permitiría capturar de manera más representativa la variabilidad espacial del $MP_{2,5}$ y la exposición de la población, mientras que las zonas de aptitud media o baja presentan condiciones menos favorables para estos fines. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de planificación ambiental y en el diseño de redes de monitoreo, especialmente en contextos donde no existen mediciones instrumentales previas, lo que permite orientar decisiones de manera técnica y preventiva.

5.3.2 Modelo multicriterio y análisis de aptitud ambiental mediante SIG

Para evaluar la aptitud ambiental del territorio de la ciudad de Constitución para el monitoreo del material particulado fino ($MP_{2,5}$), se desarrolló un análisis espacial multicriterio mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este enfoque permitió integrar de manera sistemática un conjunto de variables físicas, ambientales y socioambientales relevantes para la identificación de zonas prioritarias para la instalación de estaciones de monitoreo, en un contexto de ausencia de mediciones instrumentales previas de calidad del aire.

El modelo multicriterio aplicado en este estudio corresponde a una Combinación Lineal Ponderada (CLP), también conocida como *Weighted Linear Combination* (WLC), método ampliamente utilizado en evaluaciones de aptitud territorial mediante Sistemas de Información Geográfica. Este enfoque permite integrar múltiples criterios previamente estandarizados, asignando a cada uno un peso relativo según su nivel de influencia en el fenómeno analizado.

Los criterios considerados en el modelo fueron: uso de leña (UL), fuentes emisoras (FE), densidad poblacional (DP), vulnerabilidad social (VS) y ventilación (VE). Estos criterios fueron seleccionados en función de los antecedentes territoriales, ambientales y socioeconómicos desarrollados en el diagnóstico, considerando su influencia potencial en la generación, acumulación y exposición al material particulado fino.

Con el objetivo de otorgar mayor trazabilidad metodológica al modelo, las ponderaciones de los criterios fueron determinadas mediante el método de Análisis Jerárquico Analítico (AHP). Como resultado de su aplicación, se obtuvieron los pesos que se presentan en la Tabla XV.

Tabla XV. Ponderaciones de criterios obtenidas mediante el método AHP

Criterio	Peso
Uso de leña (UL)	0,48253
Fuentes emisoras (FE)	0,23583
Densidad poblacional (DP)	0,15226
Vulnerabilidad social (VS)	0,08680
Ventilación (VE)	0,04257

Nota. Los pesos representan la importancia relativa de cada criterio dentro del modelo multicriterio aplicado para la identificación de zonas prioritarias de monitoreo de MP_{2,5}. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el criterio con mayor peso corresponde al uso de leña, lo cual es coherente con la evidencia nacional y local que identifica la combustión residencial como una fuente relevante de material particulado fino durante los meses fríos. En segundo lugar, se ubican las fuentes emisoras, asociadas principalmente a actividades industriales, residenciales y vehiculares. Posteriormente, se considera la densidad poblacional, debido a su relación directa con la exposición potencial de la población. Finalmente, la vulnerabilidad social y la ventilación actúan como criterios complementarios para diferenciar sectores con mayor sensibilidad socioambiental y distintas condiciones de dispersión atmosférica. Con el fin de verificar la coherencia matemática de los juicios utilizados en la matriz AHP, se calculó el índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (CR). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla XVI.

Tabla XVI. Indicadores de consistencia del método AHP

Indicador	Valor
$\lambda_{\max}$	5,33
n	5
CI	0,08
RI	1,12
CR	0,07

Nota. Para matrices de cinco criterios, el índice aleatorio RI corresponde a 1,12. Fuente: Elaboración propia.

Dado que el valor de CR = 0,07 es inferior a 0,1, se considera que la matriz presenta un nivel de consistencia aceptable. Esto permite validar la coherencia de los juicios utilizados para la asignación de ponderaciones y fortalece la confiabilidad del modelo multicriterio aplicado. La integración de los criterios se estructuró bajo el enfoque de Combinación Lineal Ponderada, expresada de la siguiente forma:

$$Aptitud = (UL \times 0,48253) + (FE \times 0,23583) + (DP \times 0,15226) + (VS \times 0,08680) + (VE \times 0,04257)$$

Donde UL corresponde al uso de leña, FE a fuentes emisoras, DP a densidad poblacional, VS a vulnerabilidad social y VE a ventilación.

Esta expresión representa la integración ponderada de los criterios utilizados en el modelo multicriterio. En este caso, las variables físicas, ambientales y socioambientales fueron normalizadas a una escala común de aptitud y posteriormente ponderadas de acuerdo con su relevancia en la acumulación, dispersión y exposición potencial al material particulado fino. La combinación de estos criterios permitió generar una superficie de aptitud ambiental, clasificada en categorías de aptitud alta, media y baja para la instalación de estaciones de monitoreo.

El modelo adoptado corresponde a un enfoque compensatorio, en el cual un criterio con alta aptitud puede equilibrar parcialmente la influencia de otro menos favorable, permitiendo una evaluación integrada y territorialmente coherente. Este enfoque resulta pertinente para el caso de Constitución, debido a que la comuna no cuenta con mediciones instrumentales previas de $MP_{2,5}$, por lo que la priorización territorial debe apoyarse en variables indirectas, evidencia espacial y criterios socioambientales.

El modelo consideró variables físicas como la altitud, la pendiente y la ventilación potencial del territorio, que influyen directamente en los procesos de dispersión y acumulación de contaminantes atmosféricos. Asimismo, incorporó variables socioambientales, tales como densidad poblacional, vulnerabilidad social y exposición residencial, con el objetivo de priorizar sectores donde la población podría estar más expuesta a concentraciones elevadas de $MP_{2,5}$. Finalmente, se integraron variables ambientales asociadas a las fuentes emisoras, incluyendo la proximidad a actividades industriales, la evidencia de combustión residencial, los resultados del estudio de opacidad del humo basado en la escala de Ringelmann, el registro fotográfico y el catastro de fuentes emisoras desarrollados en etapas previas del estudio.

La integración de estos criterios permitió generar un mapa de aptitud ambiental para el monitoreo de $MP_{2,5}$, en el que el territorio comunal fue clasificado en niveles de aptitud alta, media y baja, de acuerdo con la convergencia de condiciones críticas de exposición poblacional, acumulación potencial de contaminantes y presencia de fuentes emisoras relevantes. Como se observa en la Figura 11, se identificaron sectores prioritarios dentro del radio urbano de Constitución, donde factores como el uso de leña, la densidad poblacional, la vulnerabilidad socioambiental y la cercanía a fuentes de emisión generan una mayor prioridad para la vigilancia atmosférica.

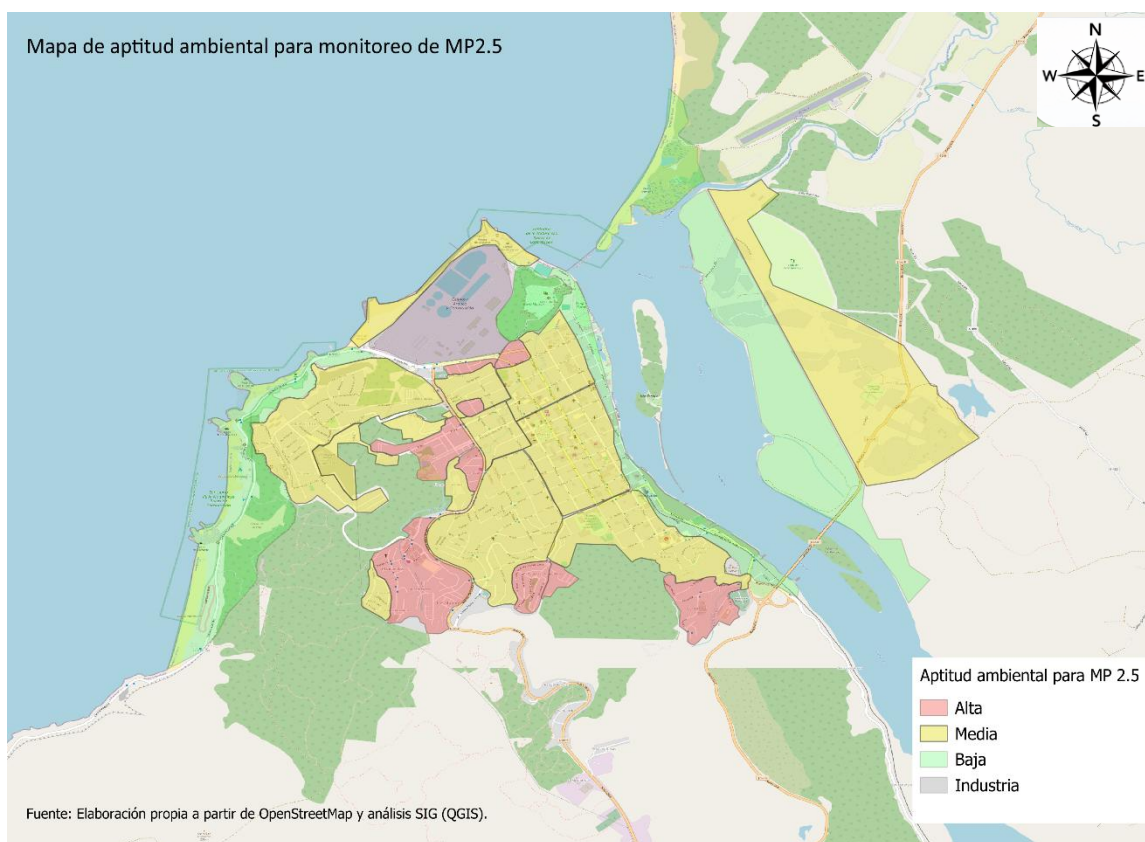


Figura 11. Mapa de aptitud ambiental para el monitoreo de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Constitución.

Fuente: Elaboración propia a partir de OpenStreetMap y análisis SIG (QGIS).

El mapa de aptitud ambiental evidencia que la aptitud para el monitoreo de MP_{2,5} no se distribuye de manera homogénea en la ciudad de Constitución, sino que se concentra en zonas específicas donde confluyen factores territoriales, ambientales y sociales desfavorables. Las zonas de alta aptitud se localizan principalmente en sectores urbanos consolidados y áreas residenciales con alta densidad habitacional, menor ventilación atmosférica, mayor vulnerabilidad social y presencia cercana de fuentes relevantes de emisión.

En particular, el análisis permitió identificar tres zonas prioritarias claramente diferenciadas. La zona Centro–Urbano Bajo presenta un nivel relevante de aptitud ambiental debido a su densidad poblacional, su morfología en depresión, que limita parcialmente la ventilación natural, y la concentración de enfermedades respiratorias registradas en los antecedentes sanitarios revisados. El sector Suroriente destaca por su vulnerabilidad socioambiental, el uso intensivo de calefacción residencial a leña húmeda y la presencia recurrente de episodios de opacidad del humo, respaldados por evidencia visual y diagnóstico territorial. Por su parte, el Sector Industrial–Oriente presenta un nivel de aptitud media–alta, asociado a la presencia de fuentes emisoras estacionarias puntuales que requieren caracterización continua y que, debido a la influencia del viento predominante, podrían impactar indirectamente en sectores residenciales y en el centro urbano.

Es importante señalar que el mapa de aptitud ambiental no representa concentraciones medidas de MP_{2,5}, sino una clasificación territorial de prioridad para el monitoreo, construida a partir de criterios ambientales, sociales y físicos ponderados mediante AHP. En consecuencia, su valor principal radica en orientar la localización estratégica de futuras estaciones de monitoreo, especialmente en sectores donde la información generada tendría mayor utilidad para la gestión ambiental y sanitaria local.

Estas zonas coinciden con los resultados del diagnóstico territorial previo, que integró evidencia fotográfica, catastro de fuentes emisoras, análisis de opacidad del humo y registros de morbilidad respiratoria, lo que refuerza la coherencia interna del modelo multicriterio aplicado. En este sentido, el análisis de aptitud ambiental constituye una base técnica para orientar la toma de decisiones en el diseño de una red de monitoreo de MP_{2,5}, priorizando los sectores donde la información generada tendría mayor relevancia para la gestión ambiental y la protección de la salud pública.

Con el objetivo de sintetizar los resultados del análisis de aptitud ambiental y facilitar su interpretación desde una perspectiva de gestión ambiental, se elaboró una clasificación cualitativa tipo semáforo, orientada a representar el grado de propensión territorial a la acumulación de material particulado fino. Esta clasificación deriva directamente de los niveles de aptitud ambiental identificados mediante el modelo multicriterio y no corresponde a concentraciones medidas de contaminantes.

Tabla XVII. Clasificación tipo semáforo de la propensión territorial a la acumulación de MP_{2,5} en la ciudad de Constitución

Clasificación de propensión	Color semáforo	Descripción sintética
Alta propensión territorial	Rojo	Sectores con convergencia de condiciones territoriales desfavorables para la dispersión atmosférica, elevada exposición poblacional y presencia de fuentes emisoras relevantes.
Propensión intermedia	Amarillo	Sectores con presencia de población y fuentes emisoras, junto con condiciones territoriales y ambientales mixtas que permiten una dispersión parcial de contaminantes.

Baja propensión territorial	Verde	Sectores con baja exposición poblacional y condiciones territoriales favorables para la dispersión atmosférica, con menor probabilidad de acumulación de MP _{2.5} .
-----------------------------	-------	--

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis multicriterio de aptitud ambiental mediante Sistemas de Información Geográfica (QGIS).

5.3.3 Propuesta de ubicación de estaciones

Considerando los resultados del modelo multicriterio de aptitud ambiental, la clasificación cualitativa tipo semáforo de propensión territorial a la acumulación de MP_{2.5} y el análisis espacial desarrollado mediante Sistemas de Información Geográfica, se propone una red preliminar de cinco estaciones de monitoreo distribuidas estratégicamente en la ciudad de Constitución. La propuesta busca representar la variabilidad espacial del material particulado fino en distintos contextos territoriales, integrando sectores urbanos, industriales y periurbanos relevantes para la gestión ambiental local.

La Figura 12 presenta el mapa integrado de aptitud ambiental y la propuesta de localización de estaciones, en el que se visualiza la correspondencia entre los niveles de aptitud ambiental, la clasificación tipo semáforo y la ubicación sugerida de cada estación de monitoreo. Este mapa permite identificar de manera espacialmente explícita los sectores con mayor propensión territorial a la acumulación de MP_{2.5} y fundamenta la selección de los puntos de monitoreo propuestos.

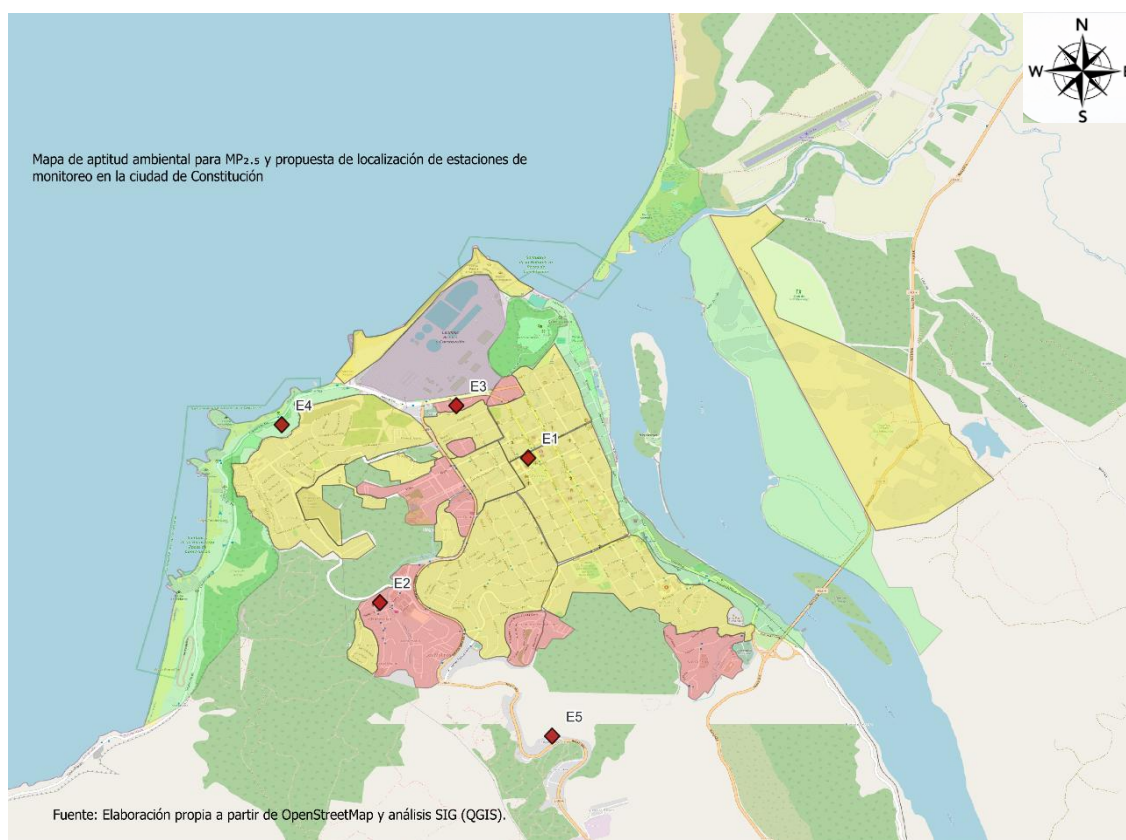


Figura 12. Mapa de aptitud ambiental para MP_{2.5} y propuesta de localización de estaciones de monitoreo en la ciudad de Constitución. Fuente: Elaboración propia a partir de OpenStreetMap y análisis SIG (QGIS).

Si bien el modelo multicriterio identificó múltiples sectores con alta aptitud territorial (categoría roja), la propuesta de estaciones no se limitó por restricciones presupuestarias, sino que respondió a criterios de representatividad espacial, redundancia de información y cobertura de fuentes emisoras diferenciadas.

En este sentido, algunos sectores clasificados como “alta aptitud” presentan continuidad territorial o comparten las mismas características de emisión y exposición que zonas ya consideradas, por lo que la instalación de estaciones adicionales en dichos puntos generaría información redundante sin aportar mayor capacidad explicativa al sistema de monitoreo.

En particular, la propuesta prioriza sectores clasificados con alta propensión territorial (semáforo rojo), donde convergen condiciones desfavorables para la dispersión atmosférica y elevada exposición poblacional, así como sectores de propensión intermedia (semáforo amarillo) y baja propensión (semáforo verde), que permiten caracterizar la transición urbano–periurbana y disponer de puntos de referencia ambiental.

Desde una perspectiva de diseño de redes de monitoreo atmosférico, no resulta eficiente concentrar múltiples estaciones en áreas con comportamiento atmosférico homogéneo. Por ello, se privilegió la cobertura de gradientes espaciales de exposición por sobre la densificación en sectores contiguos de similar dinámica ambiental.

Bajo el supuesto de disponibilidad presupuestaria ilimitada, el diseño óptimo incluiría estaciones en todos los sectores de alta aptitud identificados por el modelo. No obstante, para efectos de priorización técnica y diseño eficiente de red, se definieron cinco puntos estratégicos que maximizan la representatividad territorial y la diferenciación de fuentes emisoras.

En este contexto, la localización de las estaciones se justifica de la siguiente manera, en coherencia con la información espacial presentada en la Figura 12:

- Estación 1 – Centro Urbano (propensión intermedia, semáforo amarillo): Representa la exposición urbana promedio y permite evaluar el efecto combinado del tránsito vehicular, de la actividad urbana y del posible arrastre de contaminantes desde sectores con mayor propensión territorial.
- Estación 2 – Suroriente (alta propensión territorial, semáforo rojo): Ubicada en un sector con uso intensivo de calefacción residencial a leña, alta vulnerabilidad socioambiental y persistencia de episodios de opacidad del humo, identificado en el mapa como una de las zonas prioritarias para el monitoreo.
- Estación 3 – Sector Industrial–Oriente (propensión media–alta, transición rojo/amarillo): Orientada a la caracterización de emisiones estacionarias puntuales y a la evaluación de su posible influencia en áreas residenciales cercanas y en el centro urbano, considerando la dirección predominante del viento.
- Estación 4: 8 Periurbano Norte (baja propensión territorial, semáforo verde): Funciona como estación de referencia ambiental, permitiendo analizar la entrada de masas de aire desde sectores rurales y contrastar los niveles observados en zonas urbanas.
- Estación 5: Periurbano Sur (propensión intermedia–baja, semáforo amarillo/verde): Permite caracterizar microambientes residenciales periféricos con condiciones de ventilación variables y evaluar la extensión espacial de episodios de contaminación hacia sectores no centrales.

En conjunto, la red propuesta, apoyada en el análisis cartográfico presentado, constituye una base técnica preliminar para el diseño de un sistema local de monitoreo de MP_{2.5}, orientado al desarrollo de herramientas de alerta temprana, de análisis predictivo y de apoyo a la toma de decisiones en políticas locales de control de emisiones.

Con el fin de complementar la interpretación cartográfica presentada en la Figura 12 y facilitar la comprensión de la propuesta de localización de estaciones desde una perspectiva de gestión ambiental, se presenta a continuación la tabla XVIII, que relaciona la ubicación de las estaciones de monitoreo con la clasificación tipo semáforo de propensión territorial a la acumulación de MP_{2.5} y el objetivo principal de cada punto de medición.

En términos metodológicos, esta propuesta se diferencia de los métodos tradicionales de localización de sensores —usualmente basados en la disponibilidad de infraestructura pública o en modelos de dispersión puramente teóricos— al utilizar un enfoque de Análisis Multicriterio Espacial (MCDA). A diferencia de los métodos de optimización matemática simple, esta propuesta integra dimensiones socioambientales críticas:

Enfoque en Justicia Ambiental: Mientras que los métodos convencionales priorizan la cobertura geométrica del área, esta propuesta jerarquiza la ubicación según la densidad poblacional y la vulnerabilidad sanitaria de los habitantes de Constitución.

Validación por Morfología Local: A diferencia de modelos internacionales que asumen terrenos planos, este método adapta la localización a la topografía de cuenca y la altitud específica de la comuna, factores que condicionan el estancamiento de contaminantes.

Costo-Efectividad: La propuesta utiliza tecnología de bajo costo (entre \$150 y \$500 USD), lo que permite una mayor densidad de puntos de medición en comparación con los métodos basados en estaciones de referencia (\$20.000+ USD), logrando una mejor resolución espacial de los datos en un territorio sin registros previos."

Tabla XVIII. Propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo de MP_{2.5} según aptitud ambiental y propensión territorial

Estación	Sector sugerido	Clasificación tipo semáforo	Objetivo principal de medición
E1	Centro Urbano	Propensión intermedia (Amarillo)	Caracterizar la exposición urbana promedio y el efecto combinado de fuentes vehiculares y residenciales.
E2	Surorientado	Alta propensión (Rojo)	Monitorear emisiones residenciales intensivas y episodios persistentes de acumulación de MP _{2.5} .
E3	Sector Industrial–Oriente	Propensión media–alta (Rojo/Amarillo)	Caracterizar emisiones industriales y evaluar su posible influencia sobre áreas residenciales cercanas.
E4	Periurbano Norte	Baja propensión (Verde)	Servir como estación de referencia ambiental y evaluar la entrada de aire desde sectores rurales.

E5	Periurbano Sur	Propensión intermedia–baja (Amarillo/Verde)	Analizar la extensión espacial de episodios de contaminación hacia sectores residenciales periféricos.
----	----------------	---	--

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis multicriterio de aptitud ambiental y clasificación tipo semáforo mediante Sistemas de Información Geográfica (QGIS).

En conjunto, la información presentada en la Figura 12 y la Tabla XVIII permite visualizar de manera integrada la relación entre la aptitud ambiental del territorio, la propensión territorial a la acumulación de $MP_{2,5}$ y la ubicación propuesta de las estaciones de monitoreo. Esta aproximación constituye una base técnica preliminar para el diseño de una red local de monitoreo, orientada a apoyar la toma de decisiones en gestión ambiental y salud pública, sin sustituir la necesidad de futuras mediciones instrumentales de referencia

5.3.4 Validación preliminar con actores locales

Con el propósito de complementar el análisis técnico del modelo multicriterio y otorgar mayor legitimidad territorial a la propuesta de red de monitoreo, se realizó una validación preliminar mediante consulta a actores locales vinculados con la gestión comunal, la representación comunitaria, la planificación territorial y la gestión ambiental municipal.

Esta instancia tuvo como objetivo recoger opiniones respecto de la pertinencia de implementar una red de monitoreo de $MP_{2,5}$ en la ciudad de Constitución, así como contrastar la propuesta de localización de estaciones con la percepción territorial de actores que conocen directamente las problemáticas ambientales de la comuna.

Para esta etapa, se elaboró un informe ejecutivo de la propuesta, el cual fue presentado a los actores consultados con el objetivo de facilitar la revisión de los principales antecedentes del estudio, los resultados del diagnóstico territorial, los criterios de localización considerados y la propuesta preliminar de estaciones de monitoreo. Este documento permitió entregar una síntesis clara de la iniciativa y favorecer una retroalimentación informada por parte de los actores locales.

Los actores consultados correspondieron a un concejal de la comuna, un comité de vecinos de la población Chacarillas, un consejero Regional del Maule, la directora de Aseo, Ornato y Medio Ambiente de la Municipalidad de Constitución y el director de SECPLAN de la Municipalidad de Constitución. En términos generales, los actores manifestaron estar de acuerdo con la iniciativa, reconociendo la importancia de contar con información local sobre calidad del aire, especialmente considerando la ausencia de estaciones oficiales de monitoreo en la comuna.

Tabla XIX. Actores consultados en la validación preliminar de la propuesta

Actor consultado	Institución o ámbito de representación	Aporte principal a la validación
Concejal de la comuna	Gobierno comunal	Reconoció la pertinencia de contar con información local de calidad del aire para apoyar la toma de decisiones municipales.
Comité de vecinos de población Chacarillas	Organización comunitaria	Confirmó la percepción ciudadana respecto a episodios de humo, uso de leña y necesidad de monitoreo en sectores residenciales.
Consejero Regional del Maule	Consejo Regional del Maule (CORE)	Valoró la propuesta como insumo potencial para futuras gestiones de financiamiento regional y planificación territorial.
Directora de Aseo, Ornato y Medio Ambiente	Municipalidad de Constitución	Confirmó la relevancia ambiental de la iniciativa y su coherencia con necesidades locales de gestión y fiscalización preventiva.
Director de SECPLAN	Municipalidad de Constitución	Valoró la pertinencia de la propuesta desde la planificación comunal y su potencial articulación con futuras iniciativas de inversión pública.

Nota. La validación se desarrolló como una consulta preliminar de carácter cualitativo, apoyada en la presentación de un informe ejecutivo de la propuesta, orientada a contrastar la pertinencia territorial, social e institucional del diseño preliminar de la red de monitoreo. Fuente: Elaboración propia.

A partir de esta consulta, se identificaron tres aspectos relevantes. En primer lugar, los actores coincidieron en la necesidad de contar con datos locales de calidad del aire, debido a la inexistencia de monitoreo oficial de MP_{2,5} en Constitución. En segundo lugar, se confirmó la pertinencia de priorizar sectores residenciales con presencia de calefacción a leña, especialmente aquellos donde la comunidad percibe episodios recurrentes de humo durante los meses fríos. En tercer lugar, se valoró positivamente que la propuesta incluya sectores urbanos, periurbanos e industriales, ya que esto permitiría representar distintas realidades territoriales de la comuna.

La retroalimentación recibida no implicó cambios estructurales en la propuesta final de cinco estaciones, pero permitió confirmar la coherencia territorial de los puntos seleccionados y reforzar su justificación social, técnica e institucional. En este sentido, la validación preliminar permitió complementar el modelo técnico con una mirada local, fortaleciendo la legitimidad de la propuesta y diferenciándola de una localización basada únicamente en criterios espaciales o ambientales.

5.3.5 Diseño conceptual de la red

La propuesta tecnológica considera la implementación de sensores ópticos de PM_{2,5} alimentados mediante energía solar y conectividad IoT (WiFi/4G), permitiendo la transmisión continua de datos y el acceso a la visualización en tiempo real mediante un dashboard ciudadano.

La evidencia científica confirma que sensores ópticos calibrados pueden complementar adecuadamente a las estaciones de referencia en estudios ambientales y epidemiológicos, especialmente en comunas donde no existe monitoreo atmosférico formal, como Constitución (Chacón-Mateos et al., 2025). La evidencia científica confirma que los sensores ópticos calibrados pueden complementar adecuadamente las estaciones de referencia en estudios ambientales y epidemiológicos, especialmente en comunas donde no existe monitoreo atmosférico formal, como en Constitución (Novak et al., 2022; Chacón-Mateos et al., 2025).

Este enfoque facilita la escalabilidad del sistema, reduce los costos operativos y permite una gestión ambiental descentralizada con la participación activa de la comunidad.

El diseño conceptual también contempla:

- protocolos de mantenimiento mensual (limpieza, calibración y verificación),
- almacenamiento de datos en la nube,
- disponibilidad de alertas automáticas para episodios críticos,
- integración con futuras estaciones meteorológicas locales,
- posibilidad de expandir la red a nuevos sectores conforme crezca la ciudad.

Esta red permitiría, por primera vez en Constitución, caracterizar con precisión:

- los patrones diarios e invernales del PM_{2,5},
- la influencia del viento y topografía en el transporte del humo,
- la severidad de episodios críticos de calefacción a leña,
- el impacto de fuentes industriales,
- y la relación directa entre contaminación y salud pública.

Dado que estudios internacionales muestran que el rendimiento de los sensores ópticos para PM_{2,5} disminuye en condiciones de humedad elevada (>70–80 %), lo que genera sobrestimación de lecturas, es necesario considerar estrategias de calibración y corrección ambiental dentro del diseño de la red (Karagulian et al., 2019).

Tabla XX. Especificaciones técnicas del sistema propuesto

Componente	Descripción técnica
Sensor PM _{2,5}	Sensor óptico de medición continua, calibrable, certificación EPA equivalency
Alimentación	Panel solar monocristalino + batería de respaldo de 12–24 h
Transmisión	IoT (WiFi / 4G), protocolo MQTT, almacenamiento en nube
Plataforma	Dashboard ciudadano con visualización en tiempo real y datos abiertos
Mantenimiento	Limpieza y revisión mensual; calibración semestral; registro digital

Fuente: Elaboración propia a partir información recopilada

6.0 Necesidades para la implementación de medidas

La implementación de un sistema de monitoreo continuo de material particulado fino ($PM_{2.5}$) en la ciudad de Constitución exige asegurar un conjunto de condiciones técnicas, territoriales, normativas e institucionales que garanticen su operatividad, sostenibilidad y pertinencia local. En un territorio que carece por completo de mediciones oficiales de calidad del aire, estas necesidades constituyen requisitos habilitantes para avanzar desde la propuesta conceptual hacia una futura implementación efectiva.

En concordancia con el enfoque metodológico del presente estudio y siguiendo la lógica estructural planteada por Veloso (2022) en su análisis de requerimientos de implementación, las necesidades identificadas se agrupan en seis ámbitos: infraestructura tecnológica, condiciones territoriales y logísticas, marco normativo y administrativo, capacidades de operación y mantenimiento, gobernanza local, y aceptabilidad social y participación comunitaria.

6.1 Infraestructura tecnológica necesaria

La futura instalación de estaciones de monitoreo continuo requiere asegurar la disponibilidad y operatividad de equipamiento técnico y servicios complementarios. Entre las necesidades principales se incluyen:

- Sensores ópticos calibrables para $PM_{2.5}$, validados internacionalmente y con procedimientos compatibles con las equivalencias de la EPA, siguiendo lineamientos técnicos que recomiendan procesos de calibración periódica (Morawska et al., 2018; Karagulian et al., 2019; Chacón-Mateos et al., 2025).
- Sistemas autónomos de energía que incorporan paneles solares y baterías de respaldo para asegurar la continuidad operativa en sectores urbanos y periurbanos.
- Conectividad IoT confiable (Wi-Fi/4G) que permite la transmisión de datos en tiempo real a plataformas municipales o a servidores externos.
- Infraestructura física de soporte, tales como postes, cajas herméticas y anclajes seguros para su instalación en puntos estratégicos sin afectar la seguridad pública.
- Plataforma digital de visualización, preferentemente de acceso abierto, que facilite la transparencia de la información ambiental.

Esta infraestructura constituye la base operativa del sistema y debe estar disponible antes de cualquier etapa de validación, de prueba piloto o de futura instalación formal.

6.1.1 Estimación referencial de inversión para la red propuesta

La presente investigación corresponde a una propuesta conceptual de localización de estaciones de monitoreo y no a un proyecto de ingeniería de detalle, se incorporó una estimación referencial de inversión con el propósito de dimensionar preliminarmente los recursos necesarios para una futura implementación. Esta estimación considera una red de cinco estaciones de monitoreo de bajo costo, coherente con la propuesta territorial desarrollada en el presente estudio.

Los valores presentados tienen carácter aproximado y pueden variar según proveedor, especificaciones técnicas, condiciones de instalación, conectividad disponible y requerimientos institucionales. No obstante, permiten contar con una referencia inicial para orientar eventuales solicitudes de financiamiento ante organismos públicos como el Gobierno Regional del Maule, SUBDERE, Ministerio del Medio Ambiente o fondos concursables de protección ambiental.

Tabla XXI. Estimación referencial de inversión para red de monitoreo de MP_{2,5}

Ítem	Descripción	Cantidad	Costo unitario referencial (USD)	Costo total referencial (USD)
Sensor óptico de PM _{2,5}	Equipo de bajo costo calibrable para medición continua	5	500	2.500
Sistema de energía	Panel solar, batería y controlador	5	300	1.500
Gabinete y soporte	Caja protectora, poste, anclajes y protección climática	5	250	1.250
Conectividad IoT	Módulo WiFi/4G, tarjeta SIM o sistema de transmisión	5	150	750
Plataforma de datos	Dashboard, almacenamiento en nube y visualización	1	1.000	1.000
Instalación inicial	Montaje, configuración y pruebas de funcionamiento	5	300	1.500
Calibración inicial	Ajuste y verificación de sensores	5	200	1.000
Mantenimiento anual	Limpieza, revisión, recambio menor y control de calidad	5	300	1.500

Total referencial estimado: USD 11.000

Nota. Los valores corresponden a una estimación referencial para una red preliminar de cinco estaciones de bajo costo. No incluyen obras civiles mayores, permisos administrativos, contratación permanente de personal ni equipamiento de referencia certificado. Fuente: Elaboración propia.

La estimación muestra que una red preliminar de sensores de bajo costo podría implementarse con una inversión significativamente menor que una red basada exclusivamente en estaciones de referencia, cuyos costos unitarios pueden superar los USD 20.000 por estación. En este sentido, la propuesta presenta una alternativa técnica y económicamente viable para una comuna sin monitoreo oficial, permitiendo generar una primera línea base ambiental con mayor resolución espacial y menor costo de entrada.

6.2 Condiciones territoriales y logísticas

Para que las estaciones representen adecuadamente las condiciones atmosféricas de la ciudad de Constitución, se requiere cumplir con condiciones territoriales mínimas:

Accesibilidad física a las zonas priorizadas por el modelo multicriterio: Centro–Urbano Bajo, Suroriente, Sector Industrial–Oriente, y áreas periurbanas complementarias.

- Disponibilidad de sitios seguros de emplazamiento, tales como techos municipales, establecimientos educativos, centros comunitarios o infraestructura urbana con adecuada exposición.
- Factibilidad energética y de señal, considerando la reducción de la radiación solar en invierno y las condiciones de nubosidad propias del clima costero.
- Permisos y autorizaciones para el uso de espacios públicos o de infraestructura municipal.

Estas condiciones territoriales-logísticas determinan la capacidad real de implementar un sistema representativo, continuo y confiable.

6.3 Requisitos normativos y administrativos

La instalación de una red de monitoreo ambiental debe ajustarse al marco institucional vigente, que regula tanto la generación de datos como el uso de información ambiental relevante para la salud pública:

- Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente, que regula la gestión ambiental y los sistemas de información.
- Norma Primaria de Calidad de Aire para PM_{2,5} (DS N°12/2011), que establece los parámetros que se medirán.
- Ley 21.499 de Biocombustibles Sólidos, relevante para la interpretación del aporte residencial asociado al uso de leña.
- Protocolos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2023) para sensores de bajo costo en territorios sin redes oficiales.
- Autorizaciones municipales para el emplazamiento de equipos en bienes nacionales de uso público.
- Convenios de colaboración institucional con municipios, la SEREMI de Medio Ambiente, la SEREMI de Salud y entidades educativas.

Sin estas habilitaciones, los datos generados carecerían de reconocimiento institucional y no podrían ser integrados en instrumentos formales de gestión ambiental.

6.4 Capacidades de gestión, operación y mantenimiento

El funcionamiento sostenido de un sistema de monitoreo requiere capacidades técnicas locales que aseguren la calidad de la información:

- Limpieza, revisión y calibración periódica de los sensores.
- Gestión de datos y control de calidad (QA/QC), siguiendo lineamientos internacionales (Morawska et al., 2018; OMM, 2023).
- Mantenimiento de infraestructura, incluyendo sistemas de energía y soporte físico.
- Administración de plataformas digitales, con actualización continua.
- Comunicación de episodios críticos a la ciudadanía y autoridades sectoriales. Idealmente, estas capacidades deberían radicarse en el municipio, con apoyo técnico de universidades u organismos regionales especializados.

6.5 Gobernanza local y articulación institucional

La futura implementación del sistema depende de una gobernanza multinivel, que coordina roles y responsabilidades entre los actores involucrados:

- Municipalidad de Constitución: gestión territorial, administración del sistema y comunicación ciudadana.
- SEREMI del Medio Ambiente: acompañamiento técnico, validación metodológica y eventual integración con SINCA.
- SEREMI de Salud: valoración de emisiones con indicadores epidemiológicos.
- Instituciones educativas: apoyo técnico, espacios de instalación y desarrollo de actividades de educación ambiental.
- Actores comunitarios: participación en procesos de vigilancia ciudadana y validación social del monitoreo.

Una gobernanza clara permite asegurar la legitimidad pública, la continuidad operativa y la adecuada interpretación de los datos.

6.6 Aceptabilidad social y participación comunitaria

La experiencia internacional demuestra que los sistemas de monitoreo ambiental poseen mayor impacto cuando se acompañan de procesos participativos. En este sentido, la implementación futura en la Constitución debe contemplar:

- Programas de educación ambiental, especialmente en sectores de mayor vulnerabilidad social.
- Transparencia mediante acceso abierto a los datos, condición que fortalece la confianza y corresponsabilidad.
- Participación de la comunidad en la identificación de sitios, especialmente en barrios priorizados.
- Uso de evidencia visual (fotografías, estudio de opacidad del humo) como herramienta de sensibilización.
- Asegurar que el sistema no sea percibido con multas sancionatorias, sino preventivas y educativas.

La participación comunitaria adecuada incrementa la aceptación social del sistema y fortalece su sostenibilidad a largo plazo.

6.7 Condiciones contextuales del territorio

Finalmente, las particularidades ambientales y sociales de Constitución refuerzan la pertinencia de esta propuesta:

- Baja ventilación en sectores deprimidos topográficamente, favoreciendo la acumulación de $PM_{2.5}$.
- Aumento sostenido de urgencias respiratorias entre 2022 y 2025, según datos oficiales.
- Alta dependencia de combustión residencial, especialmente en zonas vulnerables.
- Presencia de actividad industrial en el borde urbano.
- Historia reciente de incendios forestales e industriales que han incrementado la carga ambiental.
- Ausencia total de estaciones de monitoreo oficial, lo que constituye una brecha crítica de información.

Estas condiciones justifican la necesidad urgente de avanzar hacia sistemas locales de vigilancia atmosférica.

7.0 Análisis crítico

La propuesta desarrollada en esta investigación adquiere especial relevancia en un contexto en el que la ciudad de Constitución enfrenta una brecha estructural en materia de calidad del aire. Actualmente, la comuna no cuenta con estaciones oficiales de monitoreo atmosférico, carece de registros locales de $PM_{2,5}$ y registra un aumento sostenido de enfermedades respiratorias entre 2019 y 2025, particularmente durante el período invernal. Esta combinación de factores limita significativamente la capacidad de diagnóstico, prevención y gestión ambiental a escala local.

En este escenario, el presente proyecto no solo aporta desde una perspectiva técnica mediante la identificación de zonas óptimas para la localización futura de estaciones de monitoreo de $PM_{2,5}$, sino que también propicia una discusión más amplia sobre la desigualdad ambiental territorial y la necesidad de fortalecer los sistemas de vigilancia atmosférica en comunas intermedias de Chile, excluidas de las redes oficiales de monitoreo. Tal como señalan Chacón-Mateos et al. (2025), los sensores de bajo costo presentan limitaciones asociadas a su sensibilidad ante variables ambientales como la humedad y la temperatura. No obstante, estas restricciones no invalidan su uso, sino que evidencian la necesidad de fortalecer las capacidades locales de gestión, calibración y control de calidad, particularmente en territorios que carecen de infraestructura de monitoreo tradicional.

7.1 Aporte de la propuesta frente a modelos existentes

En Chile, los sistemas de monitoreo continuo de calidad del aire se concentran mayoritariamente en ciudades declaradas zonas saturadas, latentes o con fuerte presencia industrial, tales como Temuco, Coyhaique, Santiago o Coronel. De acuerdo con la Estrategia Nacional de Calidad del Aire (MMA, 2023), más del 70 % de las comunas del país carece de estaciones de monitoreo, lo que limita la capacidad del Estado para evaluar la exposición real de la población a contaminantes atmosféricos.

En contraste con estos modelos tradicionales, la propuesta desarrollada para la ciudad de Constitución incorpora elementos innovadores y complementarios, entre los que destacan:

- La integración simultánea de variables físicas, sociales y ambientales mediante un modelo multicriterio basado en AHP y Weighted Overlay .
- La incorporación de evidencia visual y del análisis de la opacidad del humo mediante el método de Ringelmann, enfoque recomendado por la Organización Meteorológica Mundial para territorios con baja cobertura oficial (OMM, 2023).
- El uso de sensores de bajo costo calibrables, respaldados por estudios que demuestran altos niveles de compensación con equipos de referencia (Cavaliere et al., 2018; Jerrett et al., 2017).
- Un enfoque territorial con énfasis en la justicia ambiental, alineado con investigaciones latinoamericanas que evidencian una mayor exposición a $PM_{2,5}$ en zonas socialmente vulnerables (Gouveia et al., 2018).

A diferencia de instrumentos como los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), que requieren mediciones previas para su activación, esta propuesta actúa en una etapa temprana, anticipándose a la eventual necesidad de declarar a la comuna como zona latente o saturada.

7.2 Brechas identificadas en la gestión actual

El análisis territorial y sanitario permitió identificar un conjunto de brechas críticas que afectan la gestión ambiental de la ciudad de Constitución:

- Brecha 1: Inexistencia de datos locales de $PM_{2.5}$ La comuna depende exclusivamente de estaciones regionales distantes o de plataformas globales basadas en estimaciones satelitales, las cuales no representan adecuadamente las condiciones locales.
- Brecha 2: Subestimación del riesgo respiratorio Los registros de la SEREMI de Salud evidencian incrementos de hasta un 85 % en las atenciones respiratorias entre 2022 y 2025; sin embargo, no existe un mecanismo que permita correlacionar estos aumentos con episodios específicos de contaminación atmosférica.
- Brecha 3: Desigualdad territorial y vulnerabilidad social Los sectores con menor índice socioeconómico, principalmente el suroriente y áreas periféricas—concentran mayor uso de leña húmeda, viviendas con deficiente aislamiento térmico, mayor opacidad del humo y una mayor carga de morbilidad respiratoria. Esta superposición evidencia una situación de injusticia ambiental, en la que los grupos más vulnerables enfrentan niveles potenciales de exposición más altos.
- Brecha 4: Ausencia de gobernanza ambiental local. Actualmente no existe una institucionalidad municipal consolidada encargada de monitorear la calidad del aire, emitir alertas locales o coordinar acciones preventivas con establecimientos educacionales, centros de salud e industrias.

7.3 Comparación con sistemas de monitoreo internacionales

La literatura internacional demuestra que las redes de sensores de bajo costo pueden desempeñar un papel complementario relevante en territorios sin cobertura oficial. En Italia, la red AIRQino permitió reducir la incertidumbre espacial en un 35 % (Cavaliere et al., 2018); en Suiza, el proyecto OpenSense evidenció variaciones intraurbanas de $PM_{2.5}$ no detectadas previamente por estaciones tradicionales (Jerrett et al., 2017). Asimismo, en Francia, Romary et al. (2014) demostraron que una adecuada localización de estaciones mejora significativamente la representatividad territorial incluso sin aumentar el número total de sensores.

La propuesta desarrollada para Constitución se alinea con estas experiencias, adaptándolas al contexto chileno ya un territorio que carece completamente de mediciones previas.

Esta adaptación se realiza a través de un diseño metodológico de tres niveles:

Análisis de Aptitud Territorial: Se propone el uso de un modelo multicriterio basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permite priorizar las áreas de monitoreo cruzando la densidad poblacional con la ubicación de fuentes críticas (industria de celulosa y aserraderos), compensando la falta de datos históricos con análisis espacial.

Criterio de Selección Tecnológica: Se justifica técnicamente la elección de sensores de bajo costo como la herramienta idónea para este contexto, debido a su viabilidad económica y facilidad de integración en zonas donde la red oficial del Estado no tiene cobertura.

Validación Meteorológica del Emplazamiento: La propuesta define la ubicación de los puntos de medición considerando la dinámica de los vientos predominantes (Suroeste) en Constitución. De esta manera, se asegura que el diseño de la red sea capaz de captar la pluma de contaminantes desde las fuentes hacia las zonas habitacionales, estableciendo así una base técnica sólida para una futura implementación.

7.4 Valor agregado del modelo multicriterio basado en Combinación Lineal Ponderada (WLC)

El modelo multicriterio aplicado, basado en una Combinación Lineal Ponderada (Weighted Linear Combination, WLC) mediante técnicas de análisis espacial en SIG, presenta fortalezas relevantes para la gestión ambiental local: Integra información ambiental, socioeconómica y territorial en un solo marco analítico.

- Permite identificar zonas prioritarias incluso en ausencia de mediciones directas de PM_{2.5}.
- Es replicable en otras comunas del Maule con características similares.
- Entrega una base objetiva para la formulación de solicitudes de financiamiento público ante organismos como SUBDERE, GORE o MMA.

En comparación con estudios centrados exclusivamente en variables técnicas o geográficas, este enfoque incorpora específicamente la dimensión social, fundamental para políticas de equidad territorial y justicia ambiental.

7.5 Riesgos y limitaciones de la propuesta

A pesar de su solidez metodológica, la propuesta presenta ciertas limitaciones que deben considerarse. Los sensores de bajo costo cuyo valor unitario se sitúa en un rango de entre \$150 y \$500 USD, en comparación con los equipos de referencia que pueden superar los \$20.000 USD, requieren procesos periódicos de calibración y pueden verse afectados por condiciones de alta humedad propias del clima costero. Asimismo, el modelo multicriterio depende de ponderaciones que, aunque validadas mediante la literatura y la evidencia empírica, contienen un componente de subjetividad. Finalmente, la ausencia de mediciones previas impide contrastar directamente la propuesta con concentraciones reales de PM_{2.5}. No obstante, estas limitaciones no invalidan el modelo, sino que refuerzan la necesidad de avanzar en su implementación para establecer una línea base que permita estudios más avanzados en el futuro.

7.6 Tendencias futuras relevantes

Diversas tendencias internacionales refuerzan la pertinencia de esta investigación, entre ellas la transición hacia sensores IoT de bajo costo y alta resolución espacial (Kumar et al., 2015), el fortalecimiento del monitoreo ambiental participativo como herramienta de gobernanza y transparencia (Schneider et al., 2017), y el desarrollo de políticas públicas orientadas a la justicia ambiental. En este contexto, la ciudad de Constitución se encuentra en una posición estratégica para adoptar estas tecnologías antes de que la problemática alcance niveles críticos.

7.7 Contribución del proyecto a la gestión ambiental de Constitución

El presente estudio aporta a la comuna de Constitución elementos inéditos, al identificar por primera vez zonas críticas de riesgo respiratorio basadas en evidencia sanitaria, establecer una metodología replicable para la selección de sitios óptimos de monitoreo y generar insumos científicos que respalden la toma de decisiones ante organismos regionales y nacionales. Asimismo, la integración de evidencia visual y del análisis de la opacidad del humo permite incorporar la percepción ciudadana en la comprensión del problema.

En conjunto, este análisis crítico demuestra que avanzar hacia un sistema de monitoreo en línea de PM_{2.5} constituye una estrategia técnicamente viable y estratégicamente necesaria para fortalecer la salud pública y el desarrollo sustentable de la comuna.

8. Conclusiones– Recomendaciones

La presente investigación tuvo como propósito proponer un sistema de monitoreo en línea de PM_{2.5} para la ciudad de Constitución, integrando dimensiones territoriales, ambientales, sociales y sanitarias con el fin de fortalecer la gestión ambiental comunitaria y contribuir a la protección de la salud pública. Los resultados indican que la propuesta desarrollada es viable técnica y territorialmente, y constituye un avance significativo para abordar la contaminación atmosférica en un territorio donde actualmente no existen registros oficiales de calidad del aire.

La evidencia científica disponible confirma que los sistemas de monitoreo basados en sensores de bajo costo pueden complementar con éxito las redes oficiales cuando se aplican procedimientos rigurosos de calibración, corrección y verificación de la calidad (Morawska et al., 2018; Chacón-Mateos et al., 2025). En este sentido, la propuesta elaborada demuestra coherencia técnica con estudios recientes que validan el uso de estas tecnologías en territorios sin infraestructura oficial. Asimismo, la integración del análisis espacial, el diagnóstico territorial, el catastro de fuentes emisoras y los registros de opacidad del humo proporciona una base sólida para justificar la localización estratégica de estaciones futuras. La ausencia total de monitoreo en la ciudad constituye una brecha crítica para la gestión ambiental y sanitaria. Los datos de morbilidad respiratoria reportados entre 2019 y 2025 revelan un incremento sostenido de las atenciones respiratorias, alcanzando en 2025 el valor más alto de la serie, lo que sugiere que la población podría estar expuesta a condiciones ambientales adversas no cuantificadas (SEREMI de Salud del Maule, 2025). En conjunto, estos antecedentes refuerzan la necesidad de contar con un sistema de observación continua que permita evaluar la variabilidad temporal y espacial del PM_{2.5} en Constitución.

Conclusión del objetivo general

Se consiguió diseñar una propuesta técnicamente fundamentada de red de monitoreo online de PM_{2.5} para la ciudad de Constitución, utilizando análisis espacial, diagnóstico territorial, evidencia sanitaria, estudio de opacidad del humo mediante la escala de Ringelmann y un modelo multicriterio sustentado en la literatura científica (Hacıoğlu et al., 2016; Romary et al., 2014). La propuesta identifica cinco estaciones estratégicas distribuidas en zonas críticas de la ciudad, capaces de capturar la variabilidad espacial del contaminante y generar información clave para la gestión municipal y regional. Este diseño se alinea con estudios que señalan que las redes de bajo costo pueden complementar las redes oficiales cuando se aplican protocolos adecuados (Morawska et al., 2018; Karagulian et al., 2019). La propuesta representa, por tanto, la primera base técnica integral para la futura implementación de un sistema de monitoreo ambiental en un territorio que actualmente carece de datos locales.

Conclusiones por Objetivo Específico

- Estado del arte y normativa ambiental

La revisión científica normativa permitió concluir que el PM_{2.5} es uno de los contaminantes más dañinos para la salud humana, con efectos significativos incluso en concentraciones bajas (Brook et al., 2010; OMS, 2021; Pope & Dockery, 2006). El marco normativo chileno es menos estricto que los estándares internacionales, lo que puede subestimar el riesgo real para la población. Este objetivo se cumplió plenamente al entregar un marco conceptual sólido que justifica la necesidad de monitoreo continuo.

- Catastro de fuentes emisoras en la ciudad de Constitución

El levantamiento territorial evidencia tres fuentes principales de $PM_{2,5}$: residenciales (uso de leña húmeda), industriales, vehiculares. Estas conclusiones coinciden con estudios internacionales sobre la emisión por combustión en residencias (Lee et al., 2019; Duan et al., 2019; Guo et al., 2018) e industria. Este objetivo se cumplió al proporcionar un diagnóstico claro del origen de las emisiones.

Determinación de áreas óptimas para ubicación de estaciones monitoreo de calidad del aire.

El modelo multicriterio integró variables físicas, sociales, ambientales y sanitarias, junto con el estudio de opacidad del humo. Los resultados permitieron identificar tres zonas prioritarias:

Centro–Urbano Bajo, Suroriente, Sector Industrial–Oriente, y dos estaciones complementarias para cubrir zonas periurbanas. Este objetivo se cumplió, lo que generó una propuesta sólida, coherente con la literatura internacional y ajustada a la realidad territorial de Constitución. El modelo multicriterio integró estas variables mediante un Análisis de Superposición Espacial. A través de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se asignaron ponderaciones numéricas a capas de información como la topografía (física), densidad de población (social), cercanía a industrias (ambiental) y registros de morbilidad de la SEREMI de Salud (sanitaria), permitiendo que el mapa final refleje la convergencia de estos factores en un solo índice de aptitud.

Conclusiones Integradoras

Constitución presenta condiciones territoriales que favorecen la acumulación de $PM_{2,5}$, especialmente en zonas de baja altitud y alta densidad habitacional.

Las urgencias respiratorias aumentaron significativamente entre 2019 y 2025, alcanzando en 2025 el valor máximo de la serie (SEREMI de Salud del Maule, 2025).

La ausencia de monitoreo local constituye una brecha crítica que impide dimensionar la exposición real a contaminantes. El uso de leña húmeda es la principal fuente de contaminación, generando impactos desproporcionados en sectores vulnerables.

El análisis multicriterio demostró ser eficaz para la identificación de zonas prioritarias de monitoreo (Hacıoğlu et al., 2016; Romary et al., 2014).

La evidencia visual y el análisis de la opacidad del humo refuerzan la existencia de microambientes con acumulación persistente. La propuesta constituye un aporte técnico inédito para la ciudad, con potencial para transformar la gestión ambiental local y orientar la formulación de políticas públicas.

Recomendaciones

Recomendaciones Técnico-Operativas

Instalar tres estaciones base en: Centro–Urbano Bajo, Suroriente y Sector Industrial–Oriente.

Utilizar sensores ópticos calibrables e infraestructura de IoT, siguiendo las recomendaciones de la OMM (2023). Mantener rutinas de calibración y de control de calidad, siguiendo los lineamientos de Karagulian et al. (2019) y Morawska et al. (2018). Implementar una plataforma digital abierta para visualizar datos en tiempo real, Incorporar una estación meteorológica para mejorar la interpretación de episodios críticos.

Recomendaciones Institucionales

Crear una unidad municipal encargada de la gestión y mantención de la red, establecer convenios con SEREMI del Medio Ambiente, SEREMI de Salud y universidades regionales, presentar la propuesta al Gobierno Regional del Maule para su financiamiento y utilizar los datos generados para evaluar la pertinencia de declarar la Constitución como zona latente o susceptible de plan de prevención.

Recomendaciones Sociales y Comunitarias

Desarrollar programas de educación ambiental sobre el uso de leña seca y calefacción eficiente.

Implementar campañas de comunicación para alertar sobre episodios críticos, involucrar a organizaciones comunitarias y establecimientos educativos en procesos de monitoreo participativo. Garantizar el acceso ciudadano a los datos para fortalecer la transparencia y corresponsabilidad

9. Referencias Bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (2024, 7 de febrero). Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental para Materia Particulada (Norma final). Registro Federal, 89 (27), 9840–9922. <https://www.federalregister.gov/d/2024-01975>
- BioBioChile. (2024, 3 de febrero). Incendio afecta a Constitución: el alcalde asegura que está cerca de zonas pobladas y que es intencional. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-maule/2024/02/03/incendio-afecta-a-constitucion-alcalde-asegura-que-esta-cerca-de-zonas-pobladas-y-que-es-intencional.shtml>
- Brook, RD, Rajagopalan, S., Pope, CA, Brook, JR, Bhatnagar, A., Diez-Roux, AV y Kaufman, JD (2010). Inversión térmica aumenta las concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ en zonas urbanas y enfermedades cardiovasculares: Actualización de la declaración científica de la Asociación Americana del Corazón. *Circulation*, 121 (21), 2331–2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e1>
- Busch, P., Rocha, P., Lee, KJ, et al. (2024). Exposición a corto plazo a la contaminación atmosférica por partículas finas y mortalidad en adultos mayores en Chile. *Communications Earth & Environment*, 5, 469. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01634-x>
- Cavaliere, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, F., Gioli, B., Gualtieri, G., Martelli, F., Matese, A., Toscano, P., Vagnoli, C. y Zaldei, A. (2018). Desarrollo de estaciones de calidad del aire de bajo coste para redes de monitorización de nueva generación: Calibración y validación de sensores de PM_{2,5} y PM₁₀. *Sensors*, 18 (9), 2843. <https://doi.org/10.3390/s18092843>
- Castell, N., Schneider, P., Grossberndt, S., Fredriksen, MF, Sousa-Santos, G., Vogt, M. y Bartonova, A. (2018). Información localizada en tiempo real sobre la calidad del aire exterior en jardines de infancia de Oslo, Noruega, mediante nodos sensores de bajo coste. *Environmental Research*, 165, 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.019>
- <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-587/egusphere-2025-587-manuscript-version3.pdf>
- Macón-Mateos, M., García-Salamero, H., Laquai, B. y Vogt, U. (2025). Calibración y evaluación del rendimiento de sensores de calidad del aire de PM_{2,5} y NO₂ para epidemiología ambiental [Preimpresión]. EGU sphere.
- Cohen, AJ, Brauer, M., Burnett, R., Anderson, HR, Frostad, J., Estep, K., ... y Forouzanfar, MH (2017). Estimaciones y tendencias a 25 años de la carga mundial de morbilidad atribuible a la contaminación atmosférica: Un análisis de datos del Estudio de la Carga Mundial de Morbilidad de 2015. *The Lancet*, 389 (10082), 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Comisión Europea. (2024, 20 de febrero). El Consejo y el Parlamento alcanzan un acuerdo provisional para reforzar la normativa de la UE sobre calidad del aire. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_857
- Edwards, L., Milner, J., Wilkinson, P., et al. (2024). El impacto de la variación en la exposición a PM_{2,5} en la mortalidad de diplomáticos estadounidenses con múltiples reubicaciones: Un estudio de modelización. *Salud Ambiental*, 23, 89. <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01127-6>
- FAO. (2017). Chile: Mega-incendios 2017 – Lecciones aprendidas y perspectivas futuras. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/i8190en/I8190EN.pdf>
- González-Rojas, A., de la Fuente-Mella, H., Parra, S., Cancino-Haas, F., Coiro-Nicolas, C., Godoy-Saavedra, J., ... & Bravo, MA (2025). Evaluación del impacto de la exposición a la contaminación atmosférica por PM_{2,5} en el rendimiento académico de escolares en Chile. *Ciencias Aplicadas*, 15 (10), 5474. <https://doi.org/10.3390/app15105474>
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2024). Resultados Censo 2024: Población comuna de Constitución. <https://www.ine.cl>

IQAir. (2024). Informe Mundial sobre la Calidad del Aire 2024. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>

Jerrett, M., Arain, A., Kanaroglou, P., et al. (2017). Monitoreo comunitario de la exposición a la contaminación atmosférica mediante sensores de bajo coste: El estudio OpenSense de Zúrich. *Atmospheric Environment*, 150, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.024>

Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S. y Borowiak, A. (2019). Revisión de sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire. *Atmosphere*, 10(9), 506. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Sabatino, S., ... y Britter, R. (2015). El auge de la detección de bajo coste para la gestión de la contaminación atmosférica en las ciudades. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>

Lelieveld, J., Evans, JS, Fnais, M., Giannadaki, D. y Pozzer, A. (2015). La contribución de las fuentes de contaminación del aire exterior a la mortalidad prematura a escala global. *Nature*, 525 (7569), 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>

Ministerio de Energía. (2022). Ley N.º 21.499: Regula los biocombustibles sólidos. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/397z5>

Ministerio de Energía. (2022). Transición energética de Chile: Política energética nacional 2022. Gobierno de Chile. <https://energia.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (1994). Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/3r1vy>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2012). Decreto Supremo N.º 12/2011: Norma Primaria de Calidad Ambiental para MP_{2,5}. Diario Oficial de la República de Chile. <https://bcn.cl/3y4y9>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2015). Plan de Descontaminación Atmosférica para el Gran Concepción. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2015). Plan de Descontaminación Atmosférica para coronel (DS N.º 8/2015). Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2017). Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile – Acuerdo de París. Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2022). Decreto Supremo N.º 12/2022: Modifica niveles de episodios críticos de contaminación. Diario Oficial de la República de Chile. <https://bcn.cl/3x5v3>

Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2023). Estrategia Nacional de Calidad del Aire 2023–2030. Gobierno de Chile. <https://mma.gob.cl>

Morawska, L., Thai, P.K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartoňová, A., ... Williams, R. (2018). Aplicaciones de tecnologías de detección de bajo coste para la monitorización de la calidad del aire y la evaluación de la exposición: ¿Hasta dónde han llegado? *Environment International*, 116, 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>

Novak, R., Robinson, JA, Kanduč, T., Sarigiannis, D. y Kocman, D. (2022). Evaluación de la exposición individual a partículas suspendidas en el aire durante periodos de inversión térmica atmosférica. *Sensors*, 22 (19), 7116. <https://doi.org/10.3390/s22197116>

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2023). Integración de sistemas y redes de sensores de bajo costo para mejorar las aplicaciones de calidad del aire (Informe GAW N.º 293). <https://library.wmo.int/idurl/4/65954>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). Guías de calidad del aire: Actualización mundial 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

PNUMA. (2022). Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC): Informe anual 2022. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. <https://www.ccacoalition.org>

Pope, CA, y Dockery, DW (2006). Efectos en la salud de la contaminación atmosférica por partículas finas: Líneas que conectan. *Revista de la Asociación de Gestión del Aire y los Residuos*, 56 (6), 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>

Romary, T., Malherbe, L. y de Fouquet, C. (2014). Diseño espacial óptimo para el monitoreo de la calidad del aire. *Environmetrics*, 25 (1), 16–28. <https://doi.org/10.1002/env.2253>

Sabes.cl. (2025, 19 de abril). Incendio en aserradero de Constitución genera gran columna de humo: podría tardar días en apagarse. <https://sabes.cl/2025/04/19/incendio-en-aserradero-de-constitucion-genera-gran-columna-de-humo-podria-tardar-dias-en-apagarse>

Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, FR, Lahoz, WA y Bartonova, A. (2017). Mapeo de la calidad del aire urbano en tiempo casi real mediante observaciones de sensores de bajo coste e información de modelos. *Environment International*, 106, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005>

SEREMI de Salud del Maule. (2025). Datos comunales de Constitución: Casos de EPOC, bronquitis y neumonía (2020–2024) . Respuesta a Solicitud AO047T0002860.

Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). (2025). Índice Ambiental Comunal: Región del Maule, comuna de Constitución. Plataforma MABHT. <https://plataformabht.subdere.gov.cl/visualizations>

Wendt Hess, J., y Chan, W. (2025). Exposición a PM_{2.5} de bajo nivel y mortalidad en la cohorte de Medicare: El rol de los beneficiarios indígenas americanos/nativos de Alaska. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Salud Pública*, 22 (9), 1340. <https://doi.org/10.3390/ijerph22091340>

Zhang, D. y Woo, SS (2020). Monitoreo y predicción de la calidad del aire localizada en tiempo real mediante redes de detección IoT móviles y fijas. *IEEE Access*, 8, 89584–89594. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993547>