

Design and Implementation of a Low-Cost Air Quality Monitoring System through Sensor Networks in Pamplona, Colombia

Pedro Julio Reyes Monsalve²; Jose del Carmen Santiago Guevara¹

^{1,2} Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia, pedro.reyes2@unipamplona.edu.co, josesantiago@unipamplona.edu.co.

Abstract – In recent decades, industrial and urban growth has driven growing concern about air quality and its adverse impact on human health and ecosystems. In the absence of measurement stations in the city of Pamplona, Norte de Santander, a low-cost monitoring system was designed and implemented for the quantification of particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen oxides (NOx), sulfur dioxide (SO2), carbon monoxide (CO) and tropospheric ozone (O3). The system architecture was made up of three strategically located fixed stations, which were interconnected through a point-to-point link centralized in a local server. This infrastructure enabled real-time data storage, processing and validation to inform air quality indices. The methodology followed a descriptive quantitative approach with correlational analysis, using PMS5003 laser light scattering sensors and meteorological stations for spatial and temporal validation of contaminants.

The results demonstrated the viability of the system to identify concentrations that exceeded permitted limits, providing critical data for environmental management and public health in alignment with UN Sustainable Development Goals 11 and 13. The deployment of the telematics network and the developed software provided an effective tool for decision-making and territorial planning in the region.

Keywords: air, atmosphere, pollution, particles, environment, low-cost monitoring.

Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire de Bajo Costo mediante Redes Sensores en Pamplona, Colombia

Pedro Julio Reyes Monsalve²; Jose del Carmen Santiago Guevara¹

^{1,2} Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia, pedro.reyes2@unipamplona.edu.co, josesantiago@unipamplona.edu.co

Resumen– En las últimas décadas, el crecimiento industrial y urbano ha generado una creciente preocupación por la calidad del aire y su impacto adverso en la salud humana y los ecosistemas. Ante la falta de estaciones de medición en la ciudad de Pamplona, Norte de Santander, se diseñó e implementó un sistema de monitoreo de bajo costo para la cuantificación de material particulado (PM10 y PM2.5), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO2), monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O3). La arquitectura del sistema estuvo conformada por tres estaciones fijas ubicadas estratégicamente, las cuales se interconectaron a través de un enlace punto a punto centralizado en un servidor local. Esta infraestructura permitió el almacenamiento, procesamiento y validación de datos en tiempo real para informar los índices de calidad del aire. La metodología siguió un enfoque cuantitativo descriptivo con análisis correlacional, utilizando sensores de dispersión de luz láser PMS5003 y estaciones meteorológicas para la validación espacial y temporal de contaminantes. Los resultados demostraron la viabilidad del sistema para identificar concentraciones que excedían los límites permitidos, proporcionando datos críticos para la gestión ambiental y la salud pública en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 11 y 13.

Palabras clave: aire, atmósfera, contaminación, partículas, medio ambiente, monitoreo de bajo costo.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en las áreas urbanas se ha consolidado como un tema de creciente preocupación debido a sus efectos directos en la salud humana y la estabilidad del medio ambiente. Este interés ha sido impulsado por el constante crecimiento industrial y urbano, lo que ha generado una mayor conciencia sobre los impactos adversos de la contaminación atmosférica en los ecosistemas. En este contexto, la ciudad de Pamplona, Norte de Santander, enfrentaba desafíos significativos debido a fuentes de contaminación como el tráfico vehicular, la actividad industrial y otros factores antropogénicos. A pesar de esta problemática, la ciudad carecía de estaciones de medición y monitoreo de la calidad del aire, lo que resultaba en una nulidad de datos en tiempo real. El desconocimiento sobre la distribución de contaminantes específicos en las diferentes zonas urbanas dificultaba la implementación de medidas efectivas para mitigar los impactos negativos en la salud pública y el entorno

ambiental. Por lo tanto, el problema central que motivó esta investigación fue la necesidad de desarrollar un sistema integral y localizado para la medición precisa y continua de la calidad del aire en Pamplona. El sistema desarrollado fue diseñado para proporcionar datos en tiempo real, abarcando la medición de contaminantes críticos como el material particulado PM10 y PM2.5. El diseño y la construcción de esta solución representaron un desafío multidisciplinario que integró conocimientos de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica, Telecomunicaciones y Ambiental. La implementación de este sistema no solo contribuyó al conocimiento científico local, sino que tuvo un impacto directo en la toma de decisiones para la gestión ambiental y la protección de la salud pública. Asimismo, el proyecto se alineó con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 y 13 de la ONU, orientados a Ciudades y Comunidades Sostenibles y Acción por el Clima, respectivamente. Finalmente, los resultados obtenidos permitieron vigilar las concentraciones que superaban los límites máximos permisibles, aportando una herramienta vital para prevenir afecciones respiratorias, cardiovasculares y neurológicas en la población.

La implementación de redes de sensores de bajo costo ha ganado relevancia como una alternativa técnica y económica para ciudades con presupuestos limitados. Según [1], dispositivos como el PMS5003 ofrecen una correlación significativa con equipos de referencia científica, permitiendo una vigilancia constante del material particulado fino. En el contexto regional, [2] destacan que estas arquitecturas inalámbricas facilitan la democratización de datos ambientales. Este enfoque se alinea con las directrices de la Organización Mundial de la Salud [3] y la normativa colombiana vigente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [4], que exigen un control estricto de contaminantes para mitigar riesgos en la salud pública."

II. METODOLOGÍA

La investigación se ejecutó bajo un enfoque cuantitativo de corte descriptivo, complementado con un análisis correlacional. Este diseño metodológico permitió no solo caracterizar las concentraciones de contaminantes en la ciudad de Pamplona, sino también establecer relaciones estadísticas

entre las variables atmosféricas y la calidad del aire. El proceso se dividió en las siguientes fases técnicas:

A. Caracterización de Fuentes y Captura de Datos

El sistema se fundamentó en la integración de dos tipos de fuentes de información para garantizar la robustez del análisis:

- **Datos Primarios:** Se obtuvieron mediante un despliegue directo de sensores en campo, realizando mediciones periódicas bajo diversas condiciones ambientales (ciclos diurno/nocturno y variabilidad estacional) para lograr una caracterización precisa del comportamiento atmosférico.
- **Datos Secundarios:** Se realizó una revisión sistemática de literatura, estudios previos y registros históricos de instituciones ambientales para establecer una línea base comparativa.

B. Especificaciones Técnicas de la Instrumentación

La implementación técnica se centró en la precisión y la relación costo-beneficio. El núcleo de medición consistió en:

- **Monitoreo de Partículas:** Se utilizó el sensor digital PMS5003, como el observado en la figura 1, el cual operó bajo el principio de dispersión de luz láser para detectar partículas suspendidas en un rango de $0.3\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$. Este dispositivo permitió la cuantificación de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) con un alto rendimiento anti-interferencias gracias a su estructura de blindaje lateral. El sensor presenta un rango de medición de 0 a $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ con una precisión aproximada de $\pm 10\%$, siendo adecuado para aplicaciones de monitoreo ambiental urbano de bajo costo.

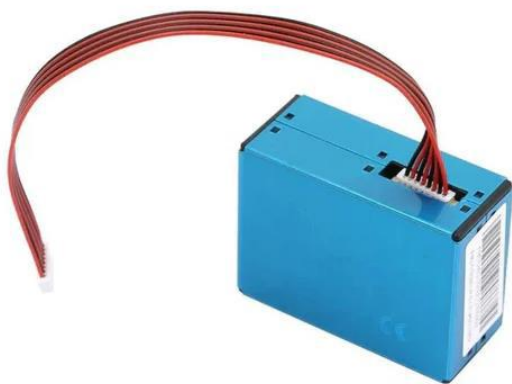


Fig. 1 Sensor PMS5003
Fuente: [2].

- **Sensores Gaseosos:** Se integraron módulos para la medición de monóxido de carbono (CO), ozono troposférico (O_3), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2).

C. Arquitectura de Red y Telemetría

Para cumplir con el propósito de monitoreo en tiempo real, se diseñó una infraestructura de comunicaciones robusta:

- **Red de Estaciones:** Se instalaron tres estaciones fijas en puntos estratégicos de la ciudad.
- **Enlace de Datos:** La interconexión se realizó mediante un enlace inalámbrico punto a punto, centralizando el flujo de información en un servidor local.
- **Gestión de Datos:** Se utilizó software para la captura, almacenamiento y validación espacio-temporal, permitiendo identificar valores extremos e inconsistencias análisis de tendencias.

D. Procedimiento de Calibración y Validación Estadística

Para asegurar la fiabilidad de los datos, el sistema se sometió a rigurosos protocolos de control:

- **Pruebas de Repetitividad:** Se realizaron ensayos de laboratorio para garantizar la estabilidad de las lecturas ante condiciones controladas.
- **Pruebas Comparativas de Campos:** Se aplicaron técnicas estadísticas para reducir el margen de error y comparar los resultados con redes de monitoreo existentes.
- **Normatividad:** Los niveles registrados se contrastaron con los estándares de calidad del aire nacionales e internacionales para evaluar el riesgo en la salud pública.

E. Alineación con Propósitos Estratégicos

La metodología no solo se limitó al aspecto técnico, sino que se diseñó para impactar áreas clave:

- **Salud Pública:** Los datos generados permitieron identificar riesgos asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- **Desarrollo Sostenible:** El diseño se articuló con los ODS 11 (Ciudades Sostenibles) y 13 (Acción por el

Clima), proporcionando una base científica para el ordenamiento territorial y la planificación urbana en Pamplona.

- **Formación e Investigación:** El proceso incluyó la participación de estudiantes, cumpliendo con los retos institucionales de fomentar la investigación regional.

F. Diseño Circuitual y Prototipado

El desarrollo técnico del sistema se centró en la creación de tres estaciones de monitoreo, capaz de operar de manera autónoma y proporcionar datos con alta precisión temporal. El diseño se estructuró en torno a la integración de sensores digitales y microcontroladores, optimizando el flujo de datos desde la captura hasta la transmisión inalámbrica. En la figura 2 se observa el diagrama de bloques de sensor.

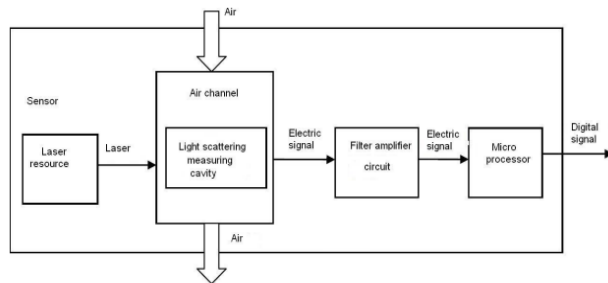


Fig. 2 Prototipo Fase de Sensor
Fuente: [1].

Selección e Integración del Sensor de Partículas y Gases

El núcleo del nodo sensor fue el dispositivo **PMS5003**, seleccionado por su capacidad para realizar mediciones digitales y universales de la concentración de partículas suspendidas en el aire. El diagrama de integración se observa en la figura 3.

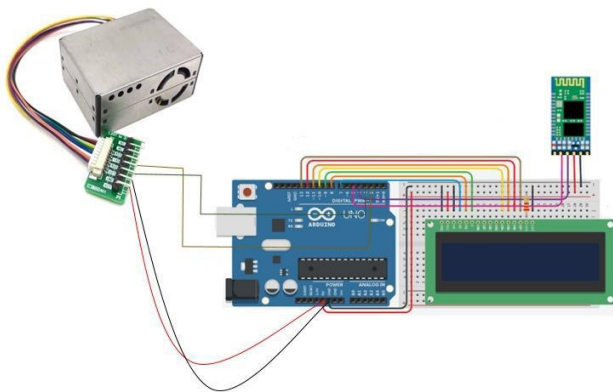


Fig. 3 Prototipo Fase de Sensor
Fuente: propia

El principio de dispersión de luz láser del sensor PMS5003 permite una detección precisa en el rango de $0.3 \mu\text{m}$ a $10 \mu\text{m}$, siguiendo los protocolos de operación digital establecidos por el fabricante[5]. La integración técnica y la programación de los nodos se basaron en metodologías de prototipado rápido para sistemas embebidos aplicadas a la calidad del aire.

El funcionamiento de este componente se basó en los siguientes aspectos técnicos:

- **Principio de Medición:** El sensor empleó un láser interno y un fotodiodo para medir la cantidad de luz dispersada por las partículas presentes en el flujo de aire, técnica conocida como detección por dispersión de luz.
- **Rango de Detección:** El dispositivo permitió identificar partículas finas en un espectro de tamaño desde $0.3 \mu\text{m}$ hasta $10 \mu\text{m}$, lo cual incluye contaminantes críticos como polvo, polen, hollín y humo.
- **Gestión de Flujo:** Se integró un ventilador interno en el sensor para atraer activamente el aire hacia la cámara de medición, asegurando una renovación constante de la muestra.
- **Interfaz de Comunicación:** La conexión con el microcontrolador se realizó mediante una interfaz de comunicación serie, facilitando la captura de datos en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Por otra parte, se incorporaron sensores de gases contaminantes que se integraron plenamente al microprocesador.

Características de Desempeño del Hardware

La implementación del circuito garantizó un alto rendimiento bajo condiciones operativas reales, destacando las siguientes especificaciones técnicas del sensor utilizado:

- **Respuesta en Tiempo Real:** El sistema fue capaz de entregar datos correctos con una latencia mínima, permitiendo el seguimiento continuo de las variaciones atmosféricas.
- **Inmunidad al Ruido:** Se aprovechó la estructura patentada de seis blindajes laterales del sensor para obtener un alto rendimiento anti-interferencias, factor crucial en entornos urbanos con alta presencia de señales electromagnéticas.

- **Estabilidad:** El diseño circuital permitió alcanzar baja tasa de falsas alarmas, validando la fiabilidad de las alertas generadas por el sistema.

Fases de Implementación y Prototipado

La construcción del sistema siguió un proceso evolutivo que culminó en el despliegue de la red:

1. **Diseño Circuital:** Se definieron los componentes y su compatibilidad con el software de análisis, asegurando la integridad de la señal digital.
2. **Pruebas de Laboratorio:** Se desarrollaron prototipos iniciales para evaluar la estabilidad de las mediciones y la repetitividad de los sensores ante concentraciones controladas.
3. **Despliegue de Red:** Tras la validación en laboratorio, se procedió a la instalación de las tres estaciones fijas en el centro de la ciudad de Pamplona, distribuidas y espaciadas equidistantemente y la configuración de la red telemática para la transmisión hacia el servidor central.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se detalla el proceso técnico que conllevó a la obtención de los resultados:

A. Análisis Comparativo frente a la Normatividad Nacional

Las estaciones de monitoreo fueron ubicadas estratégicamente considerando representatividad urbana: zonas de alto tráfico vehicular, áreas residenciales y sectores mixtos. Los sensores se instalaron a una altura promedio de 3 metros sobre el nivel del suelo para evitar interferencias directas. El intervalo de muestreo fue de 1 minuto, con agregación a promedios horarios para el análisis. Para evaluar la relevancia de los hallazgos, se contrastaron los niveles máximos registrados por el sistema con los límites establecidos en la **Resolución 2254 de 2017 de Colombia**. En la Tabla I se observa la relación entre los valores medidos en las estaciones de Pamplona durante 6 meses y los estándares legales para un tiempo de exposición de 24 horas y 1 hora según corresponda. Dichos valores corresponden al promedio más alto generalmente presentado en horas pico en términos de transporte vehicular principalmente.

Tabla 1. Valores Promedio medido.

Contaminante	Valor Máx. Registrado	Límite Res. 2254 (Colombia)	Estado
Monóxido de Carbono (CO)	205.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	5,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8h)	Cumple
Material Particulado PM10	25.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h)	Cumple
Material Particulado PM2.5	35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24h)	Alerta
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	60.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1h)	Cumple

Fuente: propia

B. Interpretación de la Variabilidad Espacio-Temporal

El análisis de los datos permitió identificar patrones críticos en la dinámica atmosférica de la ciudad:

- **Picos de Contaminación:** Se detectó un incremento significativo en las concentraciones de CO hacia las horas del mediodía principalmente, lo cual coincide directamente con el aumento del flujo vehicular en las arterias principales de Pamplona. Como se observa en la Figura 4 las concentraciones de monóxido de carbono presentaron una fluctuación cíclica directamente relacionada con la actividad urbana. El pico máximo de 205.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ registrado a las 07:22 am y la tendencia ascendente hacia el mediodía 176.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ coinciden con los periodos de mayor flujo vehicular en las arterias principales de Pamplona. Aunque estos valores se encuentran significativamente por debajo del límite de 5,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la Resolución 2254 de 2017, la sensibilidad del sistema permitió identificar con precisión los patrones de emisión móvil en la zona.

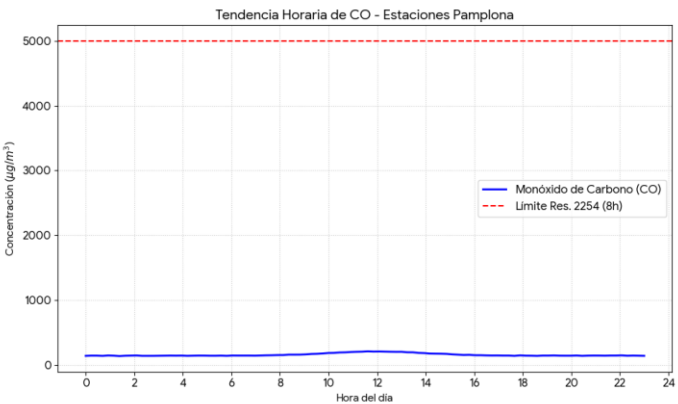


Figura 1. Tendencia Horaria de CO
Fuente: propia

Comportamiento del PM 10.

En términos generales esta medición se encuentra dentro de los parámetros normales. Las muestras obtenidas de la medición realizada por el sensor de PM₁₀, arroja un comportamiento promedio a lo largo del día tal como se observa en la figura 5.

Comportamiento del PM 2.5

El valor máximo registrado de 35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se encuentra muy cerca del límite de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto sugiere que, bajo condiciones de inversión térmica o alta humedad, la ciudad podría superar los límites de seguridad para partículas finas, las cuales presentan el mayor riesgo para la salud respiratoria. En la figura 5 es un ejemplo de muestras obtenidas de la medición realizada por el sensor de PM_{2.5}, arroja como resultado una concentración cercana al límite sugerido.

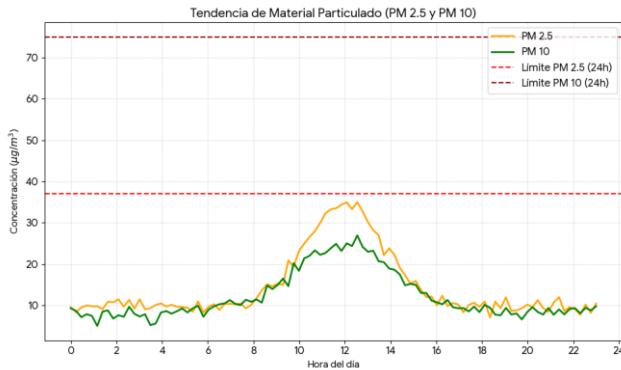


Figura 5. Concentración Partículas PM_{2.5} y PM₁₀.
Fuente: Propia

El análisis de la Figura 5 revela el hallazgo más crítico de la investigación. Mientras que el PM₁₀ se mantuvo en niveles seguros, el material particulado fino PM_{2.5} alcanzó picos de 35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ al mediodía, tal como se mencionó anteriormente. Este valor representa una condición de alerta, situándose a solo un 5.4% de distancia del límite máximo legal de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para una exposición de 24 horas. Esta proximidad sugiere que en días de baja dispersión eólica o alta humedad, la población de Pamplona podría estar expuesta a niveles que superan la normativa nacional, validando la urgencia de contar con el sistema de monitoreo desarrollado para la vigilancia epidemiológica.

- **Dispersión de Gases:**

La Figura 6 se ilustra la relación entre las variables químicas y los factores ambientales. El Ozono O₃ mostró un incremento proporcional a la radiación solar, alcanzando los 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la tarde, lo cual es característico de los contaminantes

secundarios. Por otro lado, los bajos niveles de Dióxido de Azufre SO₂, que no superaron los 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, confirman la ausencia de focos industriales pesados o el uso de combustibles con alto contenido de azufre en el radio de acción de los nodos sensores.

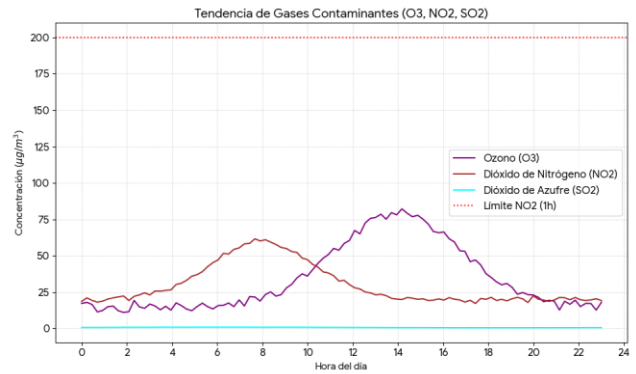


Figura 6. Concentración Dióxido de Azufre (SO₂)
Fuente: Propia

C. Discusión Técnica sobre el Sensor PMS5003

La implementación validó que la tecnología de dispersión de luz láser del sensor PMS5003 ofrece una estabilidad superior para el monitoreo urbano de bajo costo. Se observó una correlación positiva entre el aumento de la humedad relativa y ligeras desviaciones en la medición de PM₁₀, un fenómeno documentado en la literatura técnica que requiere algoritmos de compensación en futuras iteraciones del software.

En conjunto, los datos recopilados validan la operatividad técnica de la red de sensores de bajo costo para el monitoreo atmosférico en Pamplona. La capacidad del sistema para registrar fluctuaciones de PM_{2.5} y CO en rangos consistentes con la dinámica de movilidad urbana demuestra una fiabilidad adecuada para la vigilancia ambiental preventiva. Estos hallazgos confirman que la arquitectura implementada ofrece una resolución temporal y espacial suficiente para identificar patrones de contaminación, proporcionando una base de datos técnica que puede ser integrada en procesos de toma de decisiones orientados al ordenamiento territorial y a la gestión de la salud pública basada en evidencia.

IV CONCLUSIONES

La implementación del sistema de monitoreo de bajo costo en la ciudad de Pamplona demostró ser una solución técnica viable y escalable para la obtención de datos atmosféricos en tiempo real. A través de la integración de sensores como el PMS5003 y módulos para gases, se logró una caracterización detallada de contaminantes críticos

(PM2.5, PM10, CO, NOx, SO2 y O3) en un entorno que carecía previamente de instrumentación para su medición.

Eficacia Técnica: El uso de la tecnología de dispersión de luz láser permitió una detección de partículas finas, identificando picos de concentración de PM2.5 de hasta 35.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Impacto en la Salud y ODS: Los resultados obtenidos proporcionan en adelante una base científica importante para vigilar concentraciones que se aproximan a los límites máximos permisibles [4] facilitando herramientas para la prevención de afecciones respiratorias y cardiovasculares en la población local. El proyecto cumplió con los indicadores de los ODS 11 y 13, promoviendo ciudades más sostenibles y resilientes.

Aporte Institucional: La red telemática y el software desarrollados resolvieron una brecha de información técnica, fortaleciendo los procesos de investigación regional y la formación académica multidisciplinaria en la Universidad de Pamplona.

Trabajo Futuro: Como trabajo futuro, se propone la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la predicción de contaminantes y optimizar la calibración de sensores y la expansión de la red de sensores hacia zonas rurales adyacentes, con el fin de modelar con mayor precisión la dispersión de contaminantes en la región.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Expresamos agradecimiento a la Universidad de Pamplona por su apoyo institucional y por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y el desarrollo científico fue clave para el éxito de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] M. He, N. Kuerbanjiang, and S. Dhaniyala, "Performance evaluation of low-cost particulate matter sensors (PMS5003) for ambient monitoring," *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, no. 8, pp. 939–954, 2020.
- [2] J. F. González and R. Martínez, "Implementación de redes de sensores inalámbricos," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 41, no. 1, pp. 112–130, 2023.
- [3] World Health Organization, "Air Quality Guidelines," Geneva, 2021.
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Resolución 2254 de 2017," Colombia, 2017.
- [5] A. Echevarría, "Calidad del aire: uso del PMS5003 con Arduino," *TECNEU*, 2025.