



Universidad **Mariana**

Sistema portable de monitoreo de material particulado utilizando IoT para determinar calidad de aire en la ciudad de San Juan de Pasto.

Leibnitz Eduardo Chana Calderón

Universidad Mariana
Facultad Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
San Juan de Pasto
2024

Sistema portable de monitoreo de material particulado utilizando IoT para determinar calidad de
aire en la ciudad de San Juan de Pasto

Leibnitz Eduardo Chana Calderón

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Mecatrónico

Asesor

Mg. Jorge Andrés Chamorro Enríquez

Universidad Mariana
Facultad Ingeniería
Ingeniería Mecatrónica
San Juan de Pasto
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007
Universidad Mariana

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo incondicional que me brindaron durante mi carrera de Ingeniería Mecatrónica. Su aliento y respaldo fueron fundamentales en cada etapa de mi vida académica.

A mis docentes, quienes no solo compartieron sus conocimientos y experiencias, sino que también contribuyeron a forjar mi carácter y criterio. Agradezco profundamente su dedicación y orientación.

Al Departamento de Automatización, en especial al profesor Martín Moncayo, por su valiosa colaboración y cooperación. También al Departamento de Ingeniería Ambiental, especialmente al profesor Juan Carlos Narváez Burgos, por brindarme confianza y al Ingeniero Magíster Jorge Andrés Chamorro Enríquez por su constante apoyo y asesoría en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Mariana y a la Facultad de Ingeniería, por ofrecerme la oportunidad de estudiar la carrera que me enorgullece y de abrirme las puertas a un futuro prometedor en mi vida.

Dedicatoria

A mi madre y hermanos, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi mayor fortaleza durante todos estos años de estudio y esfuerzo. A mi novia, familia y amigos, por estar siempre a mi lado, brindándome aliento y alegría en cada etapa de este camino.

Su presencia y aliento han sido la luz que me ha guiado en los momentos más desafiantes, y su amor ha sido mi mayor motivación para alcanzar mis metas. Este logro también es de ustedes, y les dedico este trabajo con profundo agradecimiento y cariño.

Leibnitz Eduardo Chana Calderón

Contenido

Introducción	12
1. Resumen del proyecto	13
1.1 Descripción del problema.....	13
1.1.1 Formulación del problema	14
1.2 Justificación.....	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos	17
1.4.1 Criterios de búsqueda.....	17
1.4.2 Descripción de los estudios	20
1.4.1.1 Análisis de desarrollos previos.....	28
1.4.3 Marco teórico	29
1.4.3.1 Generalidades de la contaminación atmosférica.	30
1.4.3.1.1 Contaminación atmosférica.....	31
1.4.3.1.2 Material particulado.	32
1.4.3.1.3 Efectos en la salud y niveles de inmisión.....	34
1.4.3.2 Redes de monitoreo ambiental y sistemas de vigilancia de calidad del aire.	36
1.4.3.2.1 Tecnologías de monitoreo de material particulado.	36
1.4.3.2.2 Monitores de Material Particulado: Caracterización y Comparación Comercial.	36
1.4.3.3 Monitoreo IoT: caracterización y comparación de dispositivos.	39
1.4.3.3.1 Plataformas IoT.....	39
1.4.3.3.2 Sensores IoT de bajo costo para monitoreo de calidad de aire.	40
1.4.3.3.3 Termohigrómetros: medición de temperatura y humedad ambiental.....	41
1.4.3.3.4 Módulos de comunicación inalámbrica.....	42
1.4.3.3.5 Tarjeta controladora Raspberry Pi.....	42
1.4.3.3.6 Interfaz de visualización.....	43
1.5 Metodología	44
1.5.1 Tipo de investigación	44

1.5.2 Paradigma de investigación.....	44
1.5.3 Enfoque de investigación	44
1.5.4 Diseño de ingeniería y desarrollo técnico	45
1.5.4.1 Especificaciones y requerimientos.....	48
1.5.4.1.1 Diseño conceptual y detallado.....	49
1.5.4.1.2 Selección de componentes y materiales.....	50
1.5.5 Proceso de implementación.....	52
1.5.5.1 Construcción del prototipo.....	53
1.5.5.2 Integración de sistemas.....	55
1.5.5.3 Programación y control.....	57
1.5.6 Plan de pruebas y validación.....	58
1.5.6.1 Pruebas y funcionamiento.....	58
1.5.6.2 Verificación y validación de resultados.....	59
1.5.6.3 Instrumentos de investigación.....	61
2. Presentación de resultados	66
2.1 Análisis e interpretación de resultados.....	66
2.1.1 Análisis del primer objetivo	66
2.1.2 Análisis del segundo objetivo	67
2.1.3 Análisis del tercer objetivo.....	67
2.1.4 Análisis del cuarto objetivo.....	69
3. Conclusiones	76
4. Recomendaciones.....	78
Referencias bibliográficas	79
Anexos.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Artículos relevantes para la investigación.....	19
Tabla 2. Selección de artículos relevantes basada en el número de citas durante el periodo 2016-2021	20
Tabla 3. Clasificación del índice de calidad de aire (ICA) para Colombia.....	30
Tabla 4. Puntos de corte del ICA en Colombia.	31
Tabla 5. Efectos en la salud según calidad del aire.	35
Tabla 6. Especificaciones técnicas Raspberry Pi.	43
Tabla 7. Comparativa de las características de diversos sensores MP de bajo costo.....	51
Tabla 8. Especificaciones técnicas del sensor SPS30	51
Tabla 9. Especificaciones técnicas	63
Tabla 10. Correlación de medidas tomadas en laboratorio de Alvernia	68
Tabla 11. Desviación estándar y sesgo de SPS30 y equipo de laboratorio de Alvernia	69
Tabla 12. Ubicación de los puntos de monitoreo	70
Tabla 12. Tiempo de monitoreo con la fecha y hora.....	71
Tabla 13. Variables ambientales condicionantes	71
Tabla 14. Estadísticas obtenidas en los tres puntos de monitoreo	72

Índice de Figuras

Figura 1. Análisis de la tendencia y evolución del tema de investigación (2021)	17
Figura 2. Identificación de estudios influyentes en el monitoreo ambiental mediante IoT (2021)	18
Figura 3. Esquema taxonómico de la investigación	29
Figura 4. Proceso de emisión e inmisión de contaminantes atmosféricos	32
Figura 5. Clasificación de partículas y su impacto en el sistema respiratorio	33
Figura 6. Contaminantes que emiten vehículos con motor de gasolina.	34
Figura 7. Muestreador de aire <i>Partisol</i> ™ 2000i	37
Figura 8. Muestreador Dust Sentry Base Unit Monitor	37
Figura 9. Identificación de partes del equipo comercial DustTrak.	38
Figura 10. Contador de partículas PCE-PQC.....	38
Figura 11. Monitor personal <i>Gilian</i> 5000.	39
Figura 12. Sensor de bajo costo de material particulado MP10 y MP2,5.	41
Figura 13. Termohigrómetro para medir temperatura y humedad relativa	42
Figura 14. Modelo de interfaz gráfica en Python.....	43
Figura 15. Estructura metodológica	46
Figura 16. Diagrama del desarrollo del prototipo	49
Figura 17. Montaje del prototipo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto	50
Figura 18. Estructura en impresora 3D del sensor	52
Figura 19. Montaje del prototipo en estructura metálica para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Pasto	53
Figura 20. Montaje del prototipo en estructura impresa en 3D.....	53
Figura 21. Diagrama de conexión SPS30 a Raspberry Pi	54
Figura 22. Diseño mecánico de los ventiladores del sensor SPS30.	54
Figura 23. Ensamble del sensor SPS30 sobre su estructura.	55
Figura 24. Creación de la base de datos MySQL en la terminal de Raspberry Pi.	56
Figura 25. Integración de la plataforma Thingspeak mediante el envío de datos a través de su API	57
Figura 26. Integración de la página web local para la visualización del mapa de la ciudad y la	

presentación de resultados.....	57
Figura 27. Diagrama de validación interna	60
Figura 28. Resultados de calibración del SPS30 por método gravimétrico para PM10 y PM2.5..	62
Figura 29. Resultados de calibración del SPS30 y PMS5003 por método gravimétrico	62
Figura 30. Resultados de calibración del SPS30 y PMS5003 y laboratorio por método gravimétrico	63
Figura 31. Evaluación experimental de sensores	65
Figura 32. Instalación del prototipo sobre su base metálica superior a 2 metros de altura.....	66
Figura 33. Integración de plataforma IoT para indicar la calidad del aire en la página web personalizable con PHP.....	67
Figura 34. Indicadores de calidad de aire de los puntos de monitoreo con su respectivo marcador que indican el nivel de incidencia de concentración de MP.	70
Figura 35. Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 1.....	73
Figura 36. Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 2.....	73
Figura 37. Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 3.....	74
Figura 38. Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 4.....	75
Figura 39. Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 5.....	75

Índice de Anexos

Anexo A. Cotización equipo comercial	84
Anexo B. Diseño caja de alojamiento del sensor SPS30	85
Anexo C. Diseño de Soporte de Estructura de Condiciones Ideales para el sensor SPS30	86
Anexo D. Programación del SPS30 en Python	87
Anexo E. Link de Repositorio de GitHub público	93
Anexo F. Evidencia fotográfica del método gravimétrico	94
Anexo G. Evidencia fotográfica de los sitios de monitoreo.....	95

Introducción

En la era actual de la interconectividad y el avance tecnológico, el Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en un campo de estudio cada vez más relevante y prometedor. El aumento de la urbanización y la industrialización ha generado desafíos ambientales y de salud pública. En este sentido, el monitoreo continuo de las partículas suspendidas en el aire se ha vuelto esencial para comprender y abordar los problemas de calidad del aire en diferentes entornos urbanos.

La presente investigación tiene como objetivo principal construir un prototipo de monitoreo de material particulado aprovechando las ventajas y capacidades que ofrece el Internet de las Cosas. Este prototipo permitirá la recopilación y análisis de datos sobre la concentración de material particulado (MP) en las calles, brindando información valiosa a una base de datos relacionales (SQL) y visualización de la información en una página web.

El estudio se centra en el monitoreo continuo de las partículas suspendidas en el aire para comprender y abordar los problemas de calidad del aire en diferentes entornos urbanos. Al proporcionar datos estructurados y en tiempo real sobre la calidad del aire, se facilita la implementación de medidas preventivas para reducir la contaminación atmosférica.

Este proyecto no solo contribuye al avance del campo IoT, sino que también tiene aplicaciones prácticas en la mejora de la información del medio ambiente y la calidad de vida de las comunidades.

1. Resumen del proyecto

1.1 Descripción del problema

La calidad del aire en áreas urbanas desempeña un papel fundamental en la salud y calidad de vida de los residentes. La exposición a material particulado (MP) aerodinámico, especialmente partículas de tamaño inferior a 10 μm (PM10) y 2,5 μm (PM2,5), se ha vinculado con problemas de salud graves en humanos, incluyendo enfermedades pulmonares y circulatorias. La inhalación de estas partículas contaminantes puede penetrar profundamente en los pulmones, aumentando la incidencia de enfermedades respiratorias y cardíacas, así como las admisiones hospitalarias. Investigaciones recientes, como las realizadas por Tyler et al. (2013), han subrayado la gravedad de este problema y la necesidad de abordarlo con eficacia.

La población más vulnerable en términos de salud cardiorrespiratoria incluye a niños menores de 5 años, adultos mayores de 65 años y personas con enfermedades cardiovasculares o afecciones respiratorias previas. Estas personas son especialmente susceptibles a los aumentos en la concentración de MP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante un período determinado. Este panorama es consistente con la evidencia global que señala la contaminación del aire como un problema significativo de salud pública en las ciudades (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2019).

Según La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), la contaminación del aire está asociada con un 34% de muertes en adultos por enfermedades cardíacas, un 43% por enfermedad pulmonar obstructiva crónica y 29% por cáncer de pulmón. Además, se estima que aproximadamente el 90% de la población mundial respira aire contaminado, lo que lo subraya la magnitud del problema y su impacto en la salud respiratoria.

En el caso de la ciudad de Pasto, la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO), ha documentado concentraciones de MP superiores a los límites establecidos por la normativa colombiana. Estos límites son de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y los 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5 en un período de exposición de 24 horas (CORPONARIÑO, 2017).

Esta problemática de emisiones contaminantes atmosféricas es global, y Pasto no es una excepción. Las partículas contaminantes son resultado de diversas actividades humanas, como la industria, incendios forestales, quemas y el aumento del parque automotor. El tráfico vehicular es una de las principales fuentes de emisión, liberando partículas de carbono negro en forma de humo u hollín a través del tubo de escape (Onursal y Gautam, 1997).

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos incluyen monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no quemados (HC), compuestos de plomo, anhídrido sulfuroso y partículas sólidas (Sans, 1989).

En cuanto a las condiciones geográficas de Pasto, se destaca como una zona con mayor posibilidad de presentar altos niveles de contaminación atmosférica, especialmente en áreas con alta circulación vehicular, como la calle 18, calle 17 y entre las carreras 19 y 30. Además, se ha observado un aumento del parque automotor en la ciudad, con un incremento del 43.76% de vehículos registrados entre 2011 y 2017, según datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Además del sector vehicular, el sector industrial y el de la construcción también contribuyen significativamente a la contaminación del aire, generando polvo a través de operaciones como compactación y trituración. La geografía y el clima de Pasto, con ráfagas de viento de alta velocidad, contribuyen a que el material particulado permanezca suspendido en el aire. Por lo tanto, es de vital importancia considerar las condiciones geográficas y meteorológicas de la ciudad al abordar este problema (Benavides, 2019).

Teniendo en cuenta estos factores, es preciso implementar medidas efectivas para reducir la contaminación del aire en Pasto y proteger la salud de sus habitantes.

1.1.1 Formulación del problema

¿Cómo monitorizar material particulado presente en el aire de ambientes externos, con un nivel inferior a 10 micrómetros utilizando tecnologías IoT en la ciudad de San Juan de Pasto?

1.2 Justificación

La mala calidad del aire, reconocida como una variable causante de numerosas enfermedades respiratorias complejas, representa un fenómeno global con impactos significativos, especialmente en niños y ancianos, según la Organización Mundial de la salud (OMS, 2018). En respuesta a las crecientes exposiciones a la contaminación por material particulado, esta investigación se enfoca en la necesidad de monitorear los contaminantes atmosféricos, en particular, el material particulado (MP), en la ciudad de San Juan de Pasto. El objetivo principal es conocer su concentración y visualizar estas micropartículas que afectan directamente la calidad de aire. La información resultante se pondrá a disposición en una página web.

El prototipo a desarrollar permitirá monitorear MP_{10} y $MP_{2.5}$, y los datos recopilados se integrarán en la Internet de las Cosas (*IoT*), aportando información relevante para la red de sistemas de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) y entidades de salud pública. La implementación de este dispositivo permitirá monitorear las áreas de interés mediante la recolección de datos, lo que confirmará cuáles son las condiciones ambientales de la presencia de este contaminante.

La información acerca de las condiciones del área se presentó mediante un mapa de la ciudad, siguiendo la clasificación de calidad del aire establecida por la normativa colombiana. Esta información, organizada por colores, permitió tomar decisiones informadas sobre la calidad ambiental y generar informes en tiempo real sobre el aire en la ciudad. Además, el sistema de monitoreo de polvo continuo las 24 horas pudo detectar aumentos significativos en el número de partículas e incluso prevenir el incremento de enfermedades respiratorias en los hospitales.

Por otra parte, se observa que, hasta el año 2021, las zonas de monitoreo en los SVCA están ausentes y la cobertura no abarca otros lugares de interés, lo cual resulta en una baja representatividad de los datos de material particulado (MP). Además, la obtención de datos puede ser limitada para su interpretación debido al monitoreo parcial, omitiendo días con un mayor flujo vehicular. Por lo tanto, es necesario contribuir con información a la red de calidad del aire en la ciudad tanto de forma espacial como temporal.

Además, resulta crucial desarrollar un prototipo para recolectar información mediante sensores de polvo infrarrojos NDIR y contribuir con información de este contaminante a la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire (SISAIRE) en términos de investigación. Actualmente, las dos estaciones existentes en la ciudad, que estaban o estuvieron ubicadas en la Universidad Mariana y en el Instituto Departamental de Salud de Nariño, se encuentran descontinuadas debido a su alto costo de mantenimiento y requerimientos de personal calificado para llevar a cabo análisis en laboratorios.

Cabe destacar que la gran diferencia de este prototipo, en comparación con otros son los costos frente a dispositivos del SVCA. Estos sensores brindan la posibilidad de implementar dispositivos a bajo costo, lo cual contribuirá significativamente al monitoreo de la calidad del aire. A diferencia de los muestreadores o monitores de partículas como los de la marca *Partisol* de *Thermo Scientific* utilizados por CORPONARIÑO. Además, es importante destacar el desarrollo e investigación de estos prototipos conectados a internet, ya que permiten a las personas interesadas acceder a resultados de manera rápida y accesible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de monitoreo automático y portable integrado a la *IoT* para determinar la calidad de aire en la ciudad de San Juan de Pasto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un prototipo de monitoreo automático y portable para la medición de material particulado MP10 y MP2,5 en la ciudad de San Juan de Pasto.
- Implementar una plataforma IoT para el monitorear y almacenar la información de MP10 y MP2,5 en la ciudad de San Juan de Pasto.

- Validar el funcionamiento del prototipo mediante dispositivos del laboratorio de la Universidad Mariana.
- Ejecutar el plan de ruta en la ciudad de San Juan de Pasto para hacer la toma de muestras de forma estacionaria temporizada y de forma móvil.

1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos

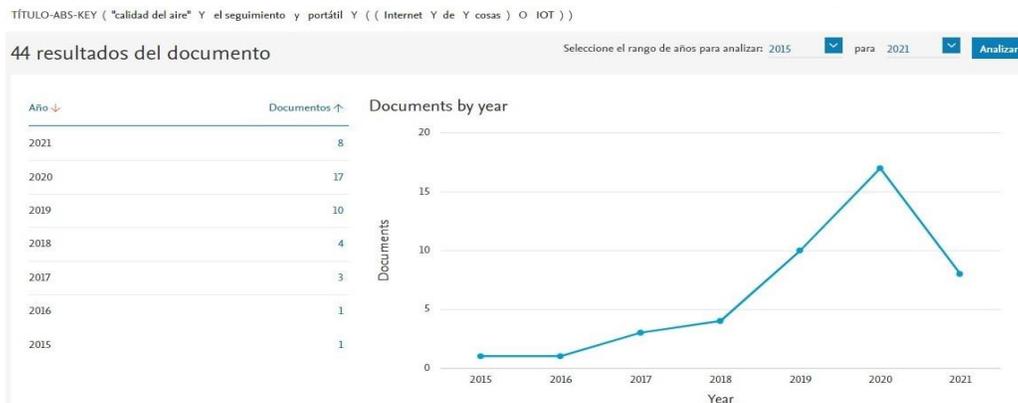
1.4.1 Criterios de búsqueda

Para realizar la búsqueda sistemática en la base de datos de Scopus, se seleccionó esta plataforma debido a su amplia cobertura en diversas disciplinas académicas. Se llevó a cabo una búsqueda avanzada utilizando palabras clave pertinentes al tema de investigación con el propósito de identificar la vigencia del tema y su evolución en los últimos cinco años.

Los resultados de esta búsqueda en Scopus se presentan en la Figura 1, que muestra el número de artículos relacionados con el tema de estudio a lo largo del tiempo. Esta figura proporciona una visión general de la tendencia y la importancia del tema en la comunidad académica.

Figura 1

Análisis de la tendencia y evolución del tema de investigación (2021)

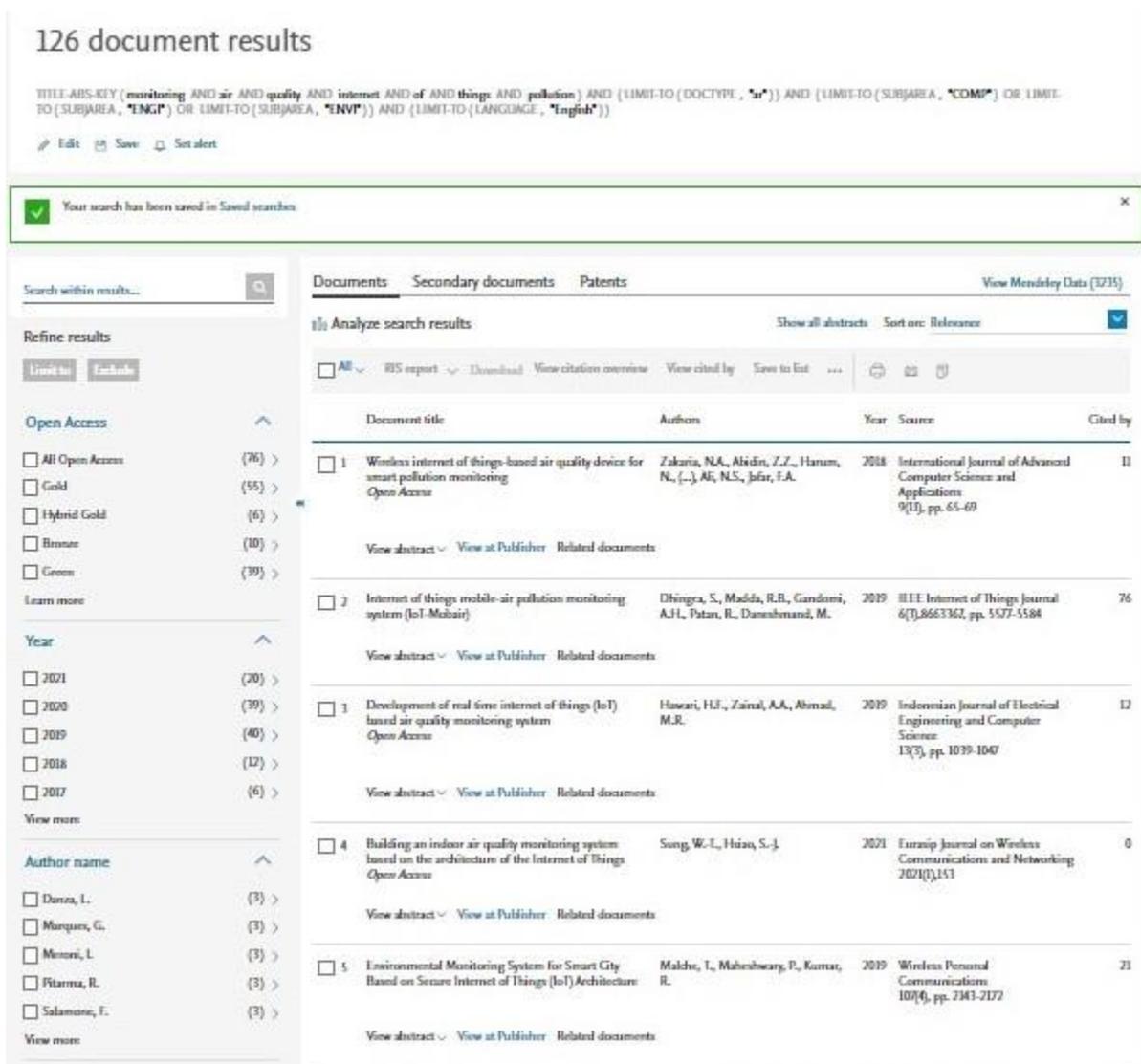


Nota: se observa que, a partir del año 2016, el desarrollo de temas relacionados con el monitoreo ambiental mediante IoT ha ganado significativa importancia en este trabajo de investigación. Fuente: Scopus.

Posteriormente, se aplicó un filtro adicional para identificar aquellos artículos que han recibido un mayor número de citas, como se muestra Figura 2. Este enfoque nos permitió identificar los estudios más influyentes y relevantes en el campo, lo cual es indicativo de su impacto y reconocimiento dentro de la comunidad científica.

Figura 2

Identificación de estudios influyentes en el monitoreo ambiental mediante IoT (2021)



Nota: Identificación de 126 artículos relacionados con la temática de investigación mediante la búsqueda avanzada en Scopus.

Al realizar esta búsqueda sistemática y analizar los resultados obtenidos, se pudo constatar que el tema de investigación es vigente y ha despertado un interés significativo en los últimos cinco años. Sin embargo, a pesar de la existencia de estudios previos, se identificaron algunas brechas y áreas que aún no han sido abordadas en profundidad, lo cual justifica la necesidad de realizar esta investigación.

La consulta realizada en 2021 arrojó inicialmente un total de 421 documentos relacionados con el tema de investigación. Posteriormente, se realizó un ajuste de las palabras clave utilizadas en la búsqueda y se filtraron únicamente los artículos en inglés, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Artículos relevantes para la investigación

Criterios de búsqueda	"Atmospheric pollution" and "particulate matter" and "air quality" or "air quality monitoring" and "internet of things" or "IoT"
Periodo de búsqueda	Sin tener en cuenta periodo de tiempo
Número de documentos encontrados con filtros	421
Idioma	Solo artículos en inglés
Filtro por área temática	Ingeniería Ciencias computacionales Ciencia ambiental y contaminación atmosférica
Tipo de documentos	Artículos
Número de documentos encontrados sin filtros	126

Nota: Los datos presentados en la tabla corresponden a un ejercicio académico realizado en seminario de investigación.

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis para determinar el número de citas de cada artículo, con el objetivo de identificar aquellos que han tenido mayor impacto en los últimos cinco años. Los criterios de investigación utilizados en este proceso se detallan en la Tabla 2, que muestra el

ranking de los artículos más citados en el periodo mencionado.

Tabla 2

Selección de artículos relevantes basada en el número de citas durante el periodo 2016-2021

Criterios de búsqueda	"Atmospheric pollution" and "particulate matter" and "air quality" or "air quality monitoring" and "internet of things" or "IoT"
Periodo de búsqueda	2015 – 2021
Número de documentos encontrados sin filtros	44
Idioma	Solo artículos en inglés
Filtro por área temática	Ingeniería Ciencias computacionales Ciencia ambiental y contaminación atmosférica
Tipo de documentos	Artículos
Número de documentos encontrados con filtros	22

Nota: La búsqueda inicial arrojó un total de 44 documentos relacionados con los criterios de búsqueda especificados. Después de aplicar los filtros, se redujo a 22 documentos.

1.4.2 Descripción de los estudios

Basado en los trabajos previos realizados en el campo del IoT, se ha demostrado un enfoque hacia la problemática de la contaminación del aire, tanto en espacios interiores como exteriores. Estos estudios han utilizado tecnologías de bajo costo y fácil acceso para permitir a los usuarios obtener información y conocimientos sobre la calidad del aire. En las ciudades, es crucial identificar áreas contaminadas por gases nocivos y determinar sus fuentes de origen. Para abordar esto, se han implementado dispositivos conectados a la nube que envían alertas a través de correo electrónico o redes sociales sobre el estado de la calidad del aire.

En cuanto a los modelos metodológicos desarrollados, se han compuesto de (4) fases. En la

primera fase, se recopilan los datos de los sensores como entradas al sistema de control, garantizando su confiabilidad. Estos datos se cargan en la nube para su procesamiento y visualización en una plataforma IoT. En la segunda fase se definen los requisitos de software, utilizando Python como lenguaje de programación para la codificación e integración de los módulos. La tercera fase implica la implementación del marcado de hipertexto (HTML) y el preprocesador de hipertexto (PHP) para el desarrollo web, junto con la plataforma ThingSpeak IoT, encargada del almacenamiento en la nube. La fase final del proyecto se enfoca en asegurar la funcionalidad, accesibilidad y usabilidad del prototipo. Esto se logró programando la API, estableciendo conexiones seguras vía HTTP, implementando sistemas de almacenamiento y recuperación de datos, y asignando una IP de dominio público. También se incluye la generación de notificaciones y alertas a través de un servidor, como el correo de Google (Zakaria et al., 2018).

En un estudio adicional sobre la contaminación de material particulado en exteriores, se destaca la importancia de implementar un sistema de monitoreo portátil en la ciudad bajo el cumplimiento de la norma ISO 14001 como estándar medioambiental. El objetivo es medir el Índice de Calidad del Aire (AQI) y proporcionar pronósticos diarios en tiempo real durante periodos de 24 horas para identificar áreas contaminadas. Se utilizan sensores de bajo costo y portátiles, integrados en la tarjeta de Arduino Uno y el módulo Wi-Fi ESP8266. Los datos recopilados se visualizan en la plataforma Ubidots IoT, accesible desde un sitio web o dispositivo móvil. La aplicación desarrollada en Java, Eclipse y el SDK de Android permite a los usuarios tomar decisiones informadas sobre rutas de viaje y prever el nivel de contaminación antes de salir de casa. Aunque el sistema presenta desafíos en la gestión de grandes volúmenes de datos generados por los sensores, se sugiere buscar formas de mejorar la integración de datos en la plataforma IoT para optimizar el rendimiento del sistema (Dhingra et al., 2019).

En otro artículo, se describe la implementación de un sistema de monitoreo de bajo costo en tiempo real durante aproximadamente 5 semanas en la ciudad de Malasia. El sistema se centró en analizar los contaminantes que afectan la calidad del aire, como el material particulado (MP2,5) y el monóxido de carbono (CO), además de registrar la temperatura ambiente y la humedad relativa. El sistema utilizó la plataforma ThingSpeak IoT, y se integró con el microcontrolador

ATmega32U4 del Arduino Yun Mini con el sensor de polvo Sharp GP2Y1010AUF0F, así como con el módulo de comunicaciones móviles (GSM) SIM900 para enviar mensajes al dispositivo móvil y visualizar la información en una pantalla LCD 16x2. Para medir la temperatura y la humedad relativa se utilizó el sensor DHT22 reconocido por su fiabilidad y estabilidad, ya que cuenta con una señal digital calibrada de fábrica. En cuanto a la comunicación de red, se empleó el módulo Wi-Fi ESP8266, que permitió la conexión de 12 tipos de sensores de gas y 5 sensores ambientales. También se desarrolló un sistema adicional para medir el CO₂ en entornos industriales utilizando el microcontrolador ATMEGA8535 y el sensor de calidad de aire TGS2600. Otro analizador se construyó con el microcontrolador PIC18F4550 y el sensor de CO MQ-7, que incluye una unidad de alimentación, una unidad de acondicionamiento de señal, un ventilador de CC sin escobillas para regular el flujo de aire, componentes electrónicos para alarmas, una pantalla LCD y microcontroladores UNIT. Sin embargo, la implementación inalámbrica del sistema se realizó utilizando un módulo Bluetooth HC-05, el cual tenía un alcance limitado, lo que resultó en una menor detección de concentraciones en la ciudad. Se destaca la importancia de calibrar adecuadamente los sensores de CO MQ-7 para garantizar su confiabilidad, ya que no vienen calibrados de fábrica. En conclusión, el estudio logró monitorear con éxito el material particulado PM_{2,5} durante 5 semanas, observando cambios significativos en la sensibilidad en comparación con el material particulado PM₁₀ (Hawari et al., 2019).

El siguiente artículo destaca la importancia de utilizar internet para medir calidad del aire de manera remota y obtener datos en tiempo real. Sin embargo, también advierte sobre los posibles riesgos de seguridad y privacidad que pueden comprometer la integridad de los datos. Se menciona la posibilidad de ataques de hackers que podrían manipular los sensores y enviar información falsa, lo que conduciría a resultados incorrectos y engañosos. Para abordar este problema, se propone implementar un sistema seguro mediante la encriptación y autenticación de usuarios y contraseñas, buscando garantizar la seguridad y eficiencia energética del sistema. Además, se menciona el desafío de manejar grandes cantidades de datos generados por cada nodo y sensor, lo que se conoce como Big Data. El sistema debe ser capaz de gestionar y procesar esta gran cantidad de datos de manera eficiente.

El desarrollo metodológico del sistema se divide en cuatro fases. La primera fase se enfoca en

la implementación de nodos con diversos sensores y la transmisión cifrada de los datos a través de internet, asegurando la conectividad del sistema. La tercera fase se centra en el almacenamiento y procesamiento de los datos en la nube, así como en la generación de alertas según reglas de seguridad definidas previamente. En esta etapa, se aplican medidas de autenticación, cifrado y autorización para proteger los datos. Por último, la fase final involucra el desarrollo de una aplicación móvil con una interfaz gráfica que permite a los usuarios autenticarse y acceder a los datos almacenados en la web. El objetivo principal del estudio es desarrollar un sistema de Internet de las Cosas (IoT) basado en una arquitectura segura, que abarque desde la autenticación de los sensores hasta el envío y cifrado de los datos del servidor hacia la nube (Malche et al., 2019).

Otro artículo propone evaluar la calidad del aire en espacios interiores mediante el uso de IoT para calcular el Índice de Calidad del Aire (IQA). Se enfoca en abordar el problema de la calidad del aire en entornos interiores donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo. El estudio busca generar informes útiles para la toma de decisiones en políticas de salud pública y facilitar el diagnóstico de problemas de salud en los pacientes. Utiliza el módulo ESP8266 y el sensor de dióxido de carbono (CO₂) MHZ-19 para la recolección de datos, con almacenamiento en una base de datos SQL SERVER y medidas de seguridad mediante autenticación de usuario. La comunicación de datos se realiza a través de servicios como ASP.NET y se utiliza una aplicación móvil diseñada en SWIFT. El costo del prototipo desarrollado es significativamente menor que los modelos comerciales disponibles en el mercado. Además, el sistema cuenta con la capacidad de cambiar al modo de punto de acceso en caso de falta de conexión a internet (Marques et al., 2019).

A continuación, se presentan los artículos más relevantes seleccionados en función del mayor número de citas durante los últimos cinco años.

El estudio de Zheng et al. (2016), analiza en profundidad la calidad del aire en zonas urbanas mediante el uso de sistemas IoT. Los resultados obtenidos demuestran la confiabilidad de los datos recopilados. Los sistemas de IoT utilizados consisten en redes de sensores inalámbricos (WSN). Para medir la concentración de PM_{2,5}, se optó por el sensor PMS5005, distribuido

estratégicamente por la ciudad. Estos sistemas se basan en la tecnología M2M, que permite una comunicación de baja potencia a través de una red LPWA, con un consumo de corriente muy bajo y baterías de litio ligeras y portátiles que pueden durar hasta diez años, complementadas con paneles solares. Los nodos WSN se colocaron alrededor de los edificios, a una distancia de hasta 3 km, permitiendo una comunicación en tiempo real hasta un punto de acceso central con una antena instalada en el techo de un edificio en el campus universitario. Los sensores láser NDIR fueron la herramienta principal utilizada, ya que convierten la dispersión de luz causada por las partículas en señales eléctricas amplificadas y procesadas para determinar su tamaño y cantidad. La Unidad del Microprocesador (MCU) utilizada fue la board STM32F103RC, una tarjeta de desarrollo de alto rendimiento basada en el microcontrolador ARM-CORTEX, ampliamente utilizada en sistemas de control industrial y de comunicaciones. Esta board consume poca energía y cuenta con características de STANDBY que permiten al sensor recopilar datos cada 10 minutos, considerando que la calidad del aire varía poco con el tiempo. Los datos recopilados son enviados a un servidor donde se realiza un filtrado para revelar la tendencia de la calidad del aire en la ubicación geográfica. El almacenamiento de datos en el servidor utiliza la tecnología WebSocket para una actualización eficiente en tiempo real a través del protocolo HTTP Server. La comunicación entre el servidor y la aplicación web se logra mediante una API y una página HTML en JavaScript y CSS, y también se desarrolla una aplicación móvil para dispositivos Android. El IQA se observó durante un periodo de dos semanas, agrupando los datos de seis contaminantes para calcular el Índice de Calidad del Aire individual (IAQI). Aunque la distancia entre los nodos y la potencia de transmisión pueden afectar los datos y valores de correlación, se verificó la confiabilidad de los datos comparándolos con una base de datos histórica reconocida y de dominio público. A pesar de ciertas discrepancias, se encontró una tendencia y correlación coincidentes. Las características meteorológicas, como la temperatura, humedad y velocidad del viento también pueden influir en los resultados. Se observó un aumento gradual en la concentración de PM_{2,5} en el séptimo día debido a la velocidad del viento por debajo de los 4 metros por segundo. En efecto, el estudio demuestra la viabilidad y confiabilidad de los sistemas de IoT para medir la calidad del aire en zonas urbanas (Zheng et al., 2016).

En el estudio de Karar et al. (2020), se desarrolló un sistema llamado "GASDUINO" en la Universidad de Shaqra para abordar el problema de la calidad del aire en ciudades industriales

como Arabia Saudita. Utilizaron la placa de Arduino Uno y el entorno de programación Arduino IDE, junto con el sensor de gas MQ-135 para detectar gases como NH₃, NO, alcohol, benceno, humo y CO₂ con el fin de determinar el AQI. El sistema mostró una respuesta rápida, obteniendo valores de 40 a 70 partes por millón (PPM) durante la noche y observando un aumento durante el día de 30 a 40 PPM. El sistema se compone de un módulo Wi-Fi ESP8266 que recibe la información de los sensores y la transmite a través de una aplicación móvil basada en Android llamada RemoteXY Cloud Server. Esta información puede ser consultada fácilmente desde cualquier dispositivo conectado a internet. La interfaz de usuario (UI) muestra al usuario el AQI en unidades de PPM que se convierten en porcentajes. Este indicador clasifica la calidad del aire como buena (0 - 50), moderada (51-150) e insalubre (151-200), representados por los colores verde, azul y rojo respectivamente. Además, la red de sensores inalámbricos de gas monitorea el AQI durante un periodo de 24 horas con el objetivo de predecir los niveles de calidad del aire utilizando modelos de inteligencia artificial como redes neuronales y lógica difusa. Con esto, se busca obtener una mejor comprensión de la calidad del aire y tomar medidas preventivas adecuadas. De este modo, el sistema GASDUINO desarrollado por Karar et al. (2020) proporciona una solución eficiente para monitorear la calidad de aire en ciudades industriales. Su implementación utiliza sensores de gas, una plataforma IoT y una aplicación móvil para brindar información en tiempo real sobre el AQI, permitiendo tomar medidas oportunas para mejorar la calidad del aire (Karar et al., 2020).

En su estudio, Taştan y Gökozan (2019) desarrollaron un sistema llamado E-Nose para medir la calidad del aire. Este sistema utiliza una combinación de sensores ópticos biométricos, incluyendo un sensor de densidad de polvo GP2Y1010AU, un sensor infrarrojo NDIR para dióxido de carbono (CO₂), un sensor de gas dual para monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), y un sensor de temperatura DHT22. El sensor de densidad de polvo GP2Y1010AU utiliza un diodo emisor de luz roja y un fototransistor para detectar la presencia de polvo en el aire. Proporciona una salida analógica proporcional a la densidad de polvo con una sensibilidad de 0.5 V/0.1 mg/m³. El sensor NDIR MH-Z 14 mide niveles de CO₂ en un rango de 0 a 5000 PPM. El sensor de gas dual MiCS-4514 se especializa en la detección de humo de tubos de escape de automóviles, pero también puede medir NO₂, CO e hidrocarburos en la atmósfera. El sensor DHT22 se utiliza para medir la temperatura ambiente. El estudio se realizó para medir

concentración de material particulado en el aire y su efecto en un grupo de 63 personas entre 18 y 65 años. Se observó un aumento en el número de latidos del corazón de 4 a 6 latidos por minuto (lpm) y un incremento en la presión arterial sistólica (PAS). El sistema E-Nose desarrollado tiene un costo aproximado de \$100 dólares y utiliza un módulo Wi-Fi ESP32 de 32 bits de doble núcleo. La plataforma IoT utilizada es Blink IoT, que permite recibir datos y graficar los niveles de gases contaminantes, temperatura y humedad. El sistema envía notificaciones cada 5 minutos. El sistema E-Nose utiliza la tarjeta de desarrollo WEMOS D1 y el sensor de polvo PMS50003 de alta interferencia. Tiene un consumo de corriente relativamente bajo de 160 miliamperios (mA) y puede ser alimentado a través de una conexión USB a 12 V CC o mediante una PowerBank de 5000 miliamperios hora (mAh). Esto permite realizar 12 mediciones en intervalos de 5 minutos, con una duración total de aproximadamente 30 horas de toma de muestras. En términos generales, el sistema E-Nose desarrollado por Taştan & Gokozan es un sistema asequible y eficiente para medir la calidad del aire. Utiliza una variedad de sensores para detectar gases contaminantes y partículas en suspensión en el aire, e integra una plataforma IoT para visualizar y analizar los datos. Los resultados del estudio destacan los efectos negativos de la contaminación del aire en la salud cardiovascular de las personas (Taştan & Gökozan, 2019).

En un estudio adicional, Mohd Pu'ad et al. (2019) desarrollaron un sistema portátil para el monitoreo remoto de la calidad del aire con el objetivo de evaluar el rendimiento de un prototipo a través de 8 pruebas, utilizando 6 sensores validados experimentalmente. Para la detección de partículas PM10, se utilizó el sensor PPD42NS, mientras que para las partículas PM2,5 se emplearon el sensor GP2Y1010AU0F y el sensor MQ-131 para analizar dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono a nivel del suelo. Además, se incorporó el sensor DHT22 para medir la humedad y temperatura del ambiente. El sistema cuenta con conectividad a internet y utiliza la geo-posición (GPS) para etiquetar la ubicación con datos de altitud y latitud, utilizando Google Maps. Estos datos se actualizan constantemente sin necesidad de estar conectado a internet. Se utiliza un servidor web que requiere mantenimiento y se emplea tecnología Python mediante el framework Flask para crear una aplicación API HTTP alojada en una dirección IP. Además, se utiliza una Raspberry Pi que permite acceder al sistema desde cualquier lugar y a través de cualquier servidor web en internet. Para mejorar la interpretación de los datos por parte del usuario, el sistema clasifica el Índice de Calidad del Aire (AQI) mediante colores. Sin

embargo, se reconoce que la asignación de una dirección IP local con una IP global cambiante cada vez que se enciende la banda ancha puede representar un problema para los usuarios no expertos, ya que recordar la dirección IP puede ser difícil. Por lo tanto, se sugiere el uso de un dominio público para facilitar su recuerdo. En cuanto a la parte de IoT, se utilizó la herramienta Google Firebase para crear una aplicación web y móvil compatible con Android y iOS. Los datos se almacenaron en la nube, lo que garantiza la confiabilidad en su gestión y una gran rapidez en su acceso. Se crearon varias páginas para organizar los datos, siendo la página de concentración de partículas de gas una de ellas. En este sentido, el sistema portátil desarrollado por Mohd Pu'ad et al. combina diversos sensores y tecnologías para el monitoreo remoto de la calidad del aire. Proporciona datos actualizados, clasifica el AQI mediante colores y utiliza la nube para un almacenamiento confiable y un acceso rápido a los datos. Este sistema ofrece una solución efectiva para evaluar la calidad del aire de manera precisa y accesible (Mohd Pu'ad et al., 2019).

En otra investigación similar, se pone énfasis en el uso de sensores de bajo costo, pero confiables para la monitorización de la calidad del aire en las ciudades. En este caso, se destaca el uso del sensor de polvo PMS3003, que se utiliza en un dispositivo portátil y flexible llamado "SentiAir". Este dispositivo SentiAir tiene dimensiones de 24,5 cm x 20 cm x 9 cm y permite la conexión de varios sensores a la placa Raspberry Pi mediante una placa externa adaptadora multi sensor. Esta adaptación permite ampliar el campo de trabajo y añadir más sensores al dispositivo. Aunque esto hace que el equipo sea más robusto, sigue ofreciendo flexibilidad y portabilidad durante la instalación. El dispositivo se conecta al puerto USB de la placa Raspberry Pi como un módem y también cuenta con conexión Ethernet, lo que permite a los usuarios controlarlo a través de la red. Dispone de un puerto serial I2C para la comunicación serial a través de los periféricos de la Raspberry Pi. La principal característica de este dispositivo es su capacidad de adaptación a las necesidades del usuario, ya que es de código abierto (Open Source) y modular. Esto significa que puede ser utilizado por personas interesadas en abordar el problema común de la calidad del aire, permitiéndoles personalizarlo según sus necesidades específicas. El dispositivo utiliza una placa Raspberry Pi 3 B+, una tarjeta SD clase 10 de 4 GB para el almacenamiento y se alimenta mediante un adaptador de corriente CA/CC. Además, cuenta con una placa adaptadora multi sensor de bajo consumo energético y una adaptación del botón de apagado (ShutDown), que mejora la configuración y encendido del dispositivo (Suriano, 2021).

1.4.1.1 Análisis de desarrollos previos. Los estudios investigados han enfocado su atención en el desarrollo de dispositivos portátiles destinados a medir la calidad del aire, centrándose en diversos aspectos como la seguridad del dispositivo, la plataforma IoT, la integración de sensores, la normatividad aplicable y los periodos de observación.

En primer lugar, se destaca la importancia de asegurar la seguridad y la autenticación del usuario en estos dispositivos, lo cual resulta crucial para salvaguardar la integridad de los datos y prevenir accesos no autorizados. Los investigadores han resaltado la necesidad de implementar medidas de seguridad sólidas que garanticen la confidencialidad y privacidad de los usuarios.

Respecto a la plataforma IoT, se ha observado que resulta fundamental contar con una infraestructura adecuada para el almacenamiento y la gestión eficiente de grandes volúmenes de datos generados por los dispositivos. Además, la capacidad de integrar múltiples sensores en el sistema es una característica valorada, ya que permite obtener mediciones más completas y precisas de la calidad del aire. Se ha mencionado el uso de placas como Raspberry Pi y Arduino, así como también tarjetas de alto rendimiento y módulos Wi-Fi para facilitar la conectividad y transmisión de datos a la nube.

Otro aspecto relevante es la normatividad aplicable, particularmente la norma ISO 14001, que establece los requisitos para un sistema de gestión ambiental. Los investigadores han subrayado la importancia de cumplir con esta normativa al desarrollar dispositivos portátiles para medir la calidad del aire, con el fin de garantizar la confiabilidad y precisión de las mediciones.

En cuanto a los periodos de observación, se ha subrayado la importancia de tomar muestras de forma continua durante periodos prolongados, incluyendo observaciones las 24 horas del día y durante varias semanas. Esto permite obtener una visión más completa y precisa de la calidad del aire en diferentes momentos y condiciones.

Estos estudios analizados han proporcionado información relevante para el desarrollo de dispositivos portátiles destinados a medir la calidad del aire, ya que han abordado aspectos clave como la seguridad, la plataforma IoT, la integración de sensores, la normatividad y los tiempos

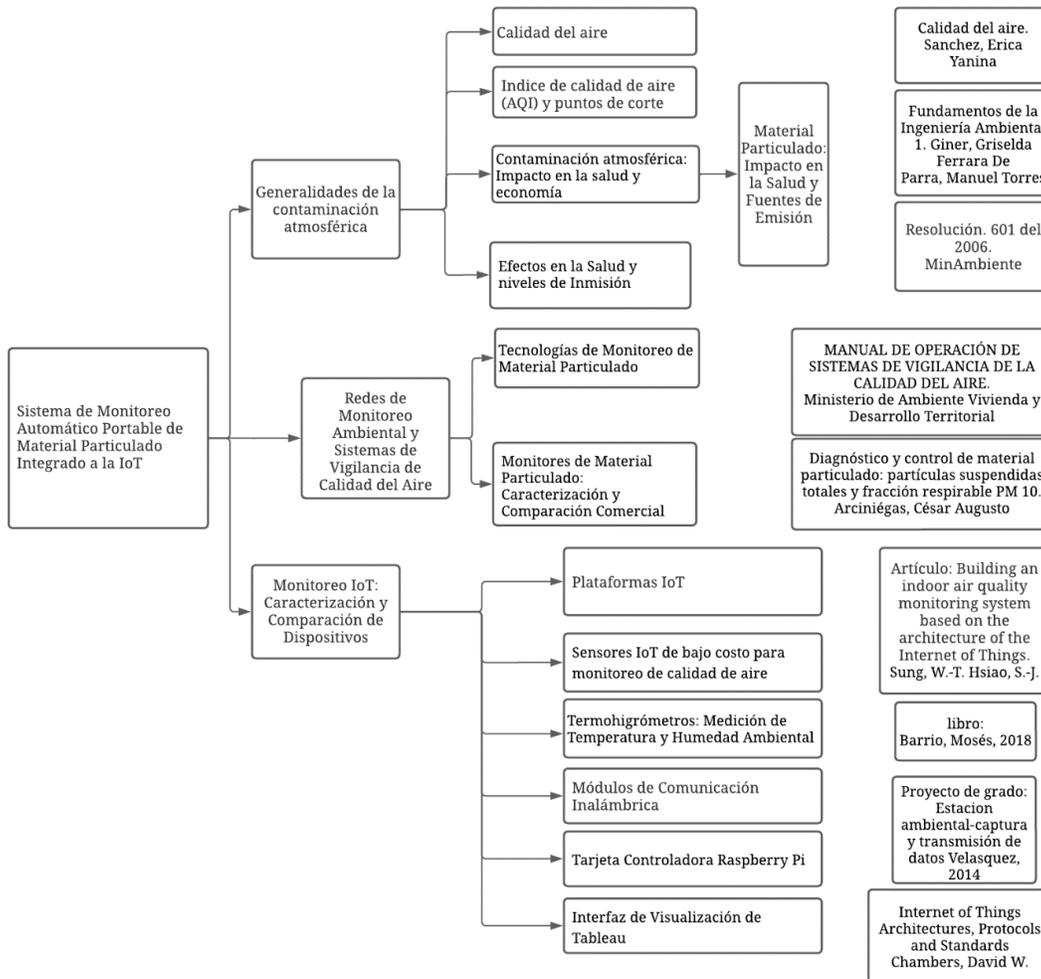
de medición de calidad del aire.

1.4.3 Marco teórico

La taxonomía de investigación es un sistema de clasificación que organiza los diversos enfoques y métodos de investigación en este estudio, facilitando la comprensión. La figura 3 proporciona una representación visual de esta taxonomía empleada.

Figura 3

Esquema taxonómico de la investigación



Nota: El método vertebrado descrito constituye un marco teórico y estructurado para esta investigación.

1.4.3.1 Generalidades de la contaminación atmosférica. La contaminación atmosférica, resultado de agentes físicos, químicos, biológicos o su combinación, impacta la calidad del aire, afectando la salud humana, el bienestar poblacional y la biodiversidad. Entre los contaminantes comunes están el material particulado (MP), metales, hidrocarburos aromáticos (HAPS) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Este fenómeno, dinámico y variable, es causado por actividades humanas y condiciones climáticas. Las fuentes incluyen la industria petroquímica, el tráfico vehicular, la agricultura y otras actividades industriales (Sanchez, 2020).

Índice de calidad de aire (AQI).

El Índice de Calidad del Aire (ICA), o AQI, es un sistema gubernamental que evalúa y comunica la calidad del aire en una escala de "buena" a "mala". En Colombia, se basa en normativas nacionales que establecen la concentración promedio de contaminantes, facilitando la clasificación y la emisión de avisos sobre posibles efectos en la salud (Sánchez, 2020).

En Colombia, el ICA se basa en normas nacionales que fijan los niveles de contaminantes, lo que posibilita una clasificación y comunicación clara sobre los potenciales impactos en la salud (Sánchez, 2020).

Según la Tabla 3, se observa que los seis contaminantes criterio evaluados en el índice de Calidad del Aire (ICA) involucra partículas PM_{2,5} y PM₁₀, dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y monóxido de carbono (CO).

Tabla 3

Clasificación del índice de calidad de aire (ICA) para Colombia

Categoría	Color	Rango
Buena	Verde	0 - 50
Aceptable	Amarillo	51 – 100
Dañina para grupos sensibles	Naranja	101 – 150
Dañina a la salud	Rojo	151 - 200

Categoría	Color	Rango
Muy dañina a la salud	Púrpura	201- 300
Peligrosa	Marrón	301 - 500

Fuente: Instituto de hidrología, climatología y estudios ambientales informe del estado de la calidad del aire en Colombia, 2019

La Tabla 4 muestra los puntos de corte utilizados en el ICA para clasificar los niveles de contaminación según la concentración de cada contaminante. Estos puntos se asignan a diferentes rangos de calidad del aire y permiten interpretar y comunicar de manera clara los niveles de concentración atmosférica y sus posibles impactos en la salud de la población.

Tabla 4

Puntos de corte del ICA en Colombia.

Puntos de Corte del ICA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
Pm10	Pm2.5	CO	SO2	NO2	O3	O3
24 horas	24 horas	1 horas	1 horas	1 horas	8 horas	1 horas
0 - 54	0 - 12	0 - 5094	0 - 93	0 - 100	0 - 106	--
55 - 154	13 - 37	5095 - 10819	94 - 197	101 - 189	107 - 138	--
155 - 254	38 - 55	10820 - 14254	198 - 486	190 - 677	139 - 167	245 - 323
255 - 354	56 - 150	14255 - 17688	487 - 797	678 - 1221	168 - 207	324 - 401
355 - 424	151 - 250	17689 - 34862	798 - 1583	1222 - 2349	208 - 393	402 - 794
425 - 604	251 - 500	34863 - 57703	1584 - 2629	2350 - 3853	394	795 - 1185

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2019).

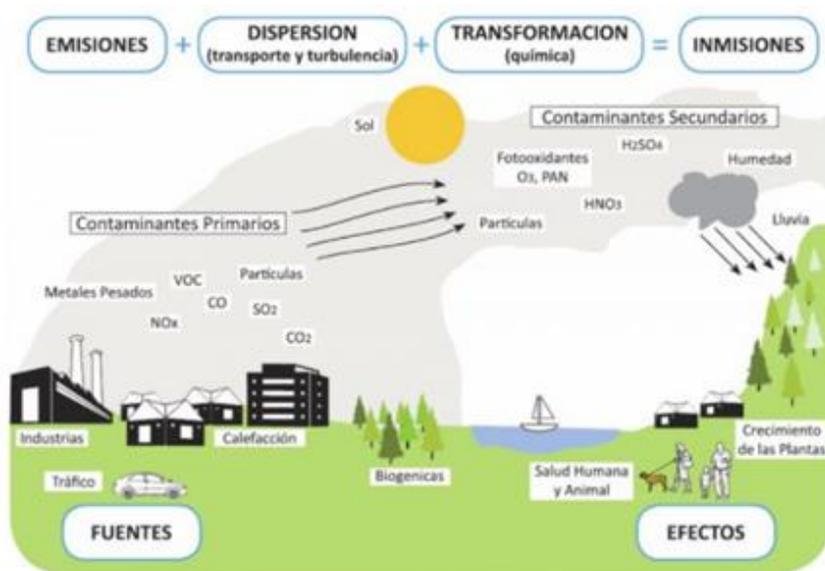
1.4.3.1.1 Contaminación atmosférica. Impacto en la salud y economía.

Los contaminantes atmosféricos, tanto sólidos, líquidos como gaseosos, tienen un impacto considerable en la calidad del aire y el medio ambiente, como se muestra en la figura 4. Estas emisiones, causadas por contaminantes primarios, tienen graves consecuencias para la salud humana y el entorno natural, con altos costos sociales y económicos, como lo señala el Ministerio

de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s.f.). En el año 2015, la mala calidad del aire provocó unas 8.025 muertes y costos económicos estimados en 12,2 billones de pesos, equivalente al 1,5% del PIB de ese año, evidenciando los impactos significativos de la contaminación atmosférica.

Figura 4

Proceso de emisión e inmisión de contaminantes atmosféricos



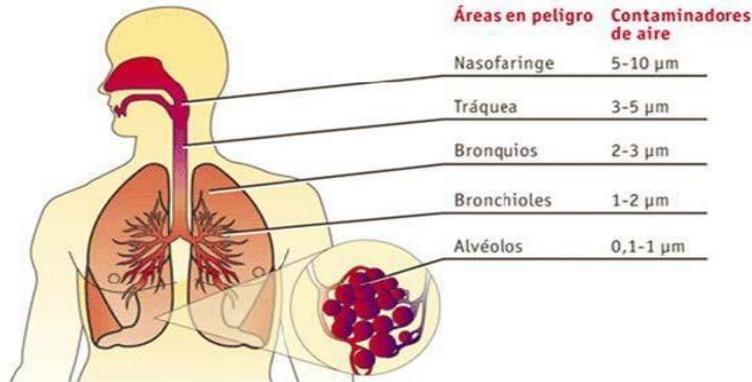
Nota: Es importante destacar que el proceso de contaminación atmosférica es complejo y está influenciado por contaminantes primarios y secundarios. Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s.f.)

1.4.3.1.2 Material particulado. Impacto en la salud y fuentes de emisión

El material particulado, compuesto por partículas sólidas y líquidas en la atmósfera (PM10 y PM2,5), afecta la salud humana, especialmente el sistema respiratorio. La figura 5 muestra el riesgo de las partículas gruesas (MP10) y finas (PM2,5). Comprender sus fuentes de emisión es crucial para abordar los problemas asociados (Sanchez, 2020).

Figura 5

Clasificación de partículas y su impacto en el sistema respiratorio



Fuente: Sanchez (2020).

El material particulado está compuesto por una variedad de sustancias de origen natural y tecnológico, como silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, óxidos, metales, carbón, alquitrán, resina, polen, hongos y bacterias. Los procesos naturales incluyen cenizas de incendios, erupciones volcánicas, aerosoles marinos y polvo de suelos desérticos. Los procesos tecnológicos, como la combustión de madera y combustibles fósiles, también generan material particulado, con etapas como la compactación y el transporte (Sanchez, 2020).

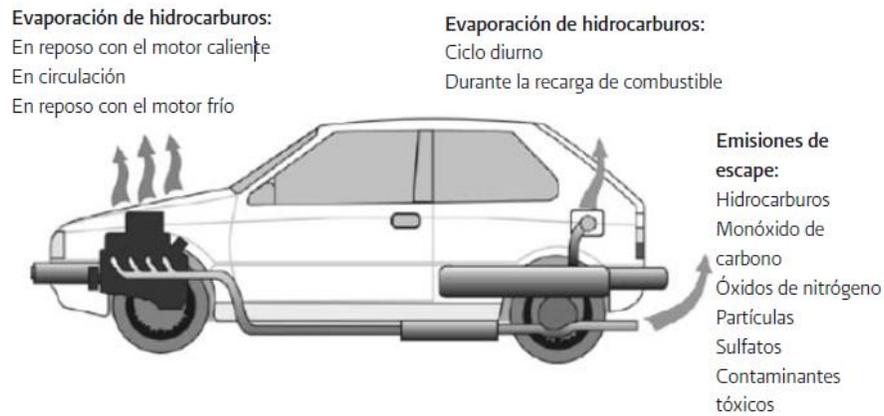
Según Tyler et al. (2013), el uso de combustibles fósiles es una característica clave en la generación de MP10. El informe CONPES 3344, que aborda la política de prevención y control de la contaminación del aire en Colombia, señala que el uso de combustibles fósiles está relacionado con el 41% de las emisiones totales en las ciudades colombianas. Esto indica que el flujo vehicular y el transporte público son las principales fuentes de esta contaminación atmosférica.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012), en San Juan de Pasto circulan aproximadamente 110 vehículos por kilómetro. Este aumento en el parque automotor ha incrementado el tráfico vehicular y, consecuentemente, la emisión de MP10 y MP2,5.

Las emisiones atmosféricas contaminantes producidas por automóviles, figura 6, son principalmente vapores generados por la combustión del motor, el depósito de combustible y los gases de escape, contribuyendo en más del 70% del total emitido, en comparación con otras fuentes como calefacciones, industria y producción de energía (Rodrigo, 2009).

Figura 6

Contaminantes que emiten vehículos con motor de gasolina.



Nota: principales contaminantes emitidos por tubo de escape producidos por motor de gasolina.

Fuente: (Onursal & Gautam, 1997).

Las emisiones por el tubo de escape se manifiestan como impurezas de color negro, finas y grasientas, que forman el humo y se adhieren a los tubos de escape. Estas emisiones son el resultado de la quema de combustible, ya sea gasolina, diésel, gas licuado o biocombustible. Esta serie de contaminantes incluye monóxidos de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y partículas (Onursal & Gautam, 1997).

1.4.3.1.3 Efectos en la salud y niveles de inmisión. Los efectos de la contaminación atmosférica en la salud varían dependiendo de la categoría y concentración de partículas, como se puede apreciar en la tabla 5. Según la clasificación o nivel de su concentración de volumen, los efectos en la salud pueden ser peligrosos, especialmente, para grupos sensibles.

Tabla 5

Efectos en la salud según calidad del aire.

Categoría	Efecto general
Buena	La calidad del aire se considera satisfactoria, y la contaminación atmosférica plantea poco o nada de riesgo
Moderada	La calidad del aire es aceptable. Sin embargo, para algunos agentes contaminadores puede haber una preocupación moderada de la salud para un número muy pequeño de la población. Por ejemplo, las personas que son inusualmente sensibles al ozono pueden experimentar síntomas de afección respiratoria.
Inadecuada para grupos sensibles	Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. Esto significa que es muy probable que sean afectados por niveles más bajos de contaminación. Por ejemplo, la población con enfermedades del pulmón está en mayor riesgo si se expone al ozono, mientras que las personas con enfermedades del pulmón o con enfermedades cardíacas están en mayor riesgo cuando son expuestas a la contaminación de partículas. Este nivel de ICA no presenta afecciones para el público en general.
Mala, peligrosa	Las personas pueden comenzar a experimentar efectos en la salud. Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos de salud más serios.
Pésima, muy peligrosa	En este nivel se debe usar una alarma para prevenir efectos en salud de toda la población, pues todos pueden presentar problemas más serios.
Critica a peligrosa.	En los valores “peligrosos” es muy probable que la población entera sea afectada.

Fuente: Gómez et al. (2006).

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible de Colombia (2006), establece que el nivel máximo legalmente permisible de inmisión para PM10 es de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para PM2,5 es de 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos para una exposición de 24 horas.

1.4.3.2 Redes de monitoreo ambiental y sistemas de vigilancia de calidad del aire. La red de calidad del aire - SISAIRES, bajo CORPONARIÑO, forma parte crucial de la red nacional de calidad del aire, encargándose de capturar, almacenar, transferir y procesar datos sobre la calidad del aire (Gómez et al., 2006).

Los Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA) miden los contaminantes en regiones específicas durante períodos determinados, siendo manuales o semiautomáticos. Estos últimos permiten la recolección de muestras por varios días sin constante supervisión, reemplazando filtros y continuando ciclos de monitoreo (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

1.4.3.2.1 Tecnologías de monitoreo de material particulado. En el marco de la vigilancia de la calidad del aire, se utilizan diferentes tipos de Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA), como los manuales, automáticos, híbridos y semiautomáticos, que emplean muestreadores para sus mediciones.

Un ejemplo es el analizador automático de MP10, que usa el método de absorción para analizar partículas. Recolecta partículas mediante una cinta, cuya intensidad de rayos beta se mide tras ser atenuada por el material particulado, relacionando esta intensidad con la masa del material en la cinta (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

El proceso incluye la validación de datos y la identificación de factores que pudieron afectar el muestreo, para su inclusión en la base de datos. Luego, se analizan y consolidan los datos para obtener conclusiones sobre la calidad del aire. Finalmente, los datos se envían al analista desde la estación mediante dispositivos que toman promedios de tiempo configurados por el usuario, en un proceso llamado preprocesamiento (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

1.4.3.2.2 Monitores de Material Particulado: Caracterización y Comparación Comercial. En el ámbito del monitoreo de material particulado, destacan dispositivos como el muestreador de aire Partisol TM 2000i de Thermofisher Scientific (figura 7), fabricado por Thermofisher

Scientific, Este dispositivo permite el monitoreo de PM2,5 y PM10 y cuenta con un puerto USB para la descarga de datos (Thermo FisheR, s. f.).

Figura 7

Muestreador de aire Partisol™ 2000i.



Fuente: Thermo FisheR (s. f.).

El monitor de partículas Dust Sentry, diseñado por San Ambiente, es un dispositivo portátil que proporciona mediciones continuas de partículas en el aire, aprobado para PM10 y capaz de medir también PM2,5 y PM1. Sus ventajas incluyen una tarjeta SD para el registro de datos, acceso mediante módem y sensores meteorológicos. Se destaca su instalación sencilla y la oferta de PLC SCADA. Según una cotización realizada a San Ambiente, su precio oscila entre \$12,000 y \$15,000 dólares (Sentry & Sentry, s. f.). (Anexo A).

Figura 8

Muestreador Dust Sentry Base Unit Monitor



Fuente: Sentry & Sentry (s. f.).

Dentro del mercado de monitoreo de aerosoles se encuentra el DustTrak, un dispositivo especializado en medir fracciones de masa y tamaño de polvo. Utiliza fotómetros láser de dispersión de luz para proporcionar datos en tiempo real (TSI, 2013).

Figura 9

Identificación de partes del equipo comercial DustTrak.



Tomado de: *DustTrak II 8530* (s. f.)

El Monitor de Polvo PCE - PQC 13EU, figura 10, es un sensor que mide con precisión partículas de hollín y aerosoles generados por combustión, construcción y fábricas. Opera en modos automático y manual, proporcionando resultados en una pantalla LCD a color y también mide la temperatura y humedad (Instruments et al., s.f.).

Figura 10

Contador de partículas PCE-PQC



Fuente: Instruments et al. (s. f.).

Finalmente, existen equipos personales como la bomba de muestreo *Gilian 5000*, figura 11, utilizada para monitorear ambientes polvorientos. Esta bomba permite realizar mediciones directas de material particulado tomando muestras de aire, y muestra y registra la información en su pantalla Display durante un periodo de operación de hasta 8 horas (Viaindustrial, s. f.).

Figura 11

Monitor personal Gilian 5000.



Fuente: Viaindustrial (s. f.).

1.4.3.3 Monitoreo IoT: caracterización y comparación de dispositivos. El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a la conexión de objetos a internet para recopilar y compartir datos, mejorando así la prestación de servicios. Esto abarca desde dispositivos de consumo como hogares inteligentes y asistentes personales, hasta aplicaciones comerciales en sectores como la salud y el transporte inteligente, automatización del hogar para un consumo eficiente, mejoras en la infraestructura urbana, manejo optimizado de la energía, monitoreo ambiental y aplicaciones en la agricultura (Barrio, 2018).

1.4.3.3.1 Plataformas IoT. Ubidots IoT y Thingspeak IoT son plataformas líderes en el mercado actual. Ubidots facilita la conexión de dispositivos mediante protocolos HTTP, MQTT y TCP/UDP. Su estructura jerárquica permite actualizar y almacenar datos de sensores en variables, creando puntos de datos en la nube con marcas de tiempo en milisegundos. Ofrece una clave API para autenticación y permite hasta 30,000 datos mensuales de forma gratuita. Destaca por su capacidad para publicar datos mediante el protocolo API REST cliente-servidor y su enfoque en

la seguridad con autenticación de usuario por token (Quiñones et al., 2017).

Por otro lado, Thingspeak IoT es una plataforma Open Source que facilita la conexión, almacenamiento y recuperación de datos desde sensores en la nube a través de su API, según IoT Internet of Things (s.f.). Thingspeak utiliza el protocolo HTTP sobre internet o LAN para la comunicación y brinda la posibilidad de realizar análisis e interactuar con los datos recibidos. Los sensores pueden enviar información a la plataforma mediante API REST o mediante el protocolo MOOT, diseñado para dispositivos con limitaciones de ancho de banda y alta latencia (Thingspeak, 2016).

Thingspeak (2016) destaca por su integración con Matlab, permitiendo la creación de scripts y visualización de datos en canales públicos. Estas plataformas ofrecen soluciones valiosas para dispositivos IoT, facilitando la adquisición, almacenamiento y análisis eficiente y seguro de datos en diversas aplicaciones y entornos.

1.4.3.3.2 Sensores IoT de bajo costo para monitoreo de calidad de aire. Los sensores IoT de bajo costo (SBC) son dispositivos que capturan datos de una entrada física y generan una salida eléctrica. Estos sensores están disponibles en el mercado por precios entre \$100 y \$500 dólares, lo que los hace atractivos para la industria en el monitoreo de la calidad del aire. Aunque ofrecen información en tiempo real y manejan grandes volúmenes de datos, su falta de estandarización y validación es una desventaja importante. Los sensores ópticos son una variante común, utilizando haces de luz para interactuar con sustancias químicas de interés (Epistemus, s.f.).

En la figura 12 se muestra un ejemplo de un sensor de bajo costo para el monitoreo de material particulado (PM10 y PM2,5). Este dispositivo de la marca Plantower, modelo PMS5003, está diseñado para analizar partículas con diámetros inferiores a 10 micrómetros. La imagen muestra la conexión del sensor que permite su integración en sistemas de monitoreo de calidad del aire.

Figura 12

Sensor de bajo costo de material particulado MP10 y MP2,5.



Nota: Plantower PMS5003 analizador de MP inferior a 10 micrómetros y su respectiva conexión.

Fuente: UNIT Electronics (s.f.).

1.4.3.3 Termohigrómetros: medición de temperatura y humedad ambiental. El termohigrómetro es un dispositivo portátil que mide la temperatura y humedad relativa del ambiente. Es útil para controlar condiciones de almacenamiento en medicamentos y productos sensibles. Estos dispositivos tienen certificación ISO para garantizar precisión. Incluyen una pantalla LCD, un sensor termistor para temperatura y un sensor resistivo para humedad (Farmasesores, s.f.).

En la figura 13 se muestra el termohigrómetro modelo THGN800, capaz de medir temperatura y humedad relativa ambiental. Estos dispositivos, por su precisión y facilidad de uso, son fundamentales para asegurar condiciones ideales en diferentes entornos y usos.

Figura 13

Termohigrómetro para medir temperatura y humedad relativa



Nota: equipo medidor climatológico industrial. Fuente: Codex Meteoclimatic (s.f.).

1.4.3.3.4 Módulos de comunicación inalámbrica. En IoT, se utilizan módulos especializados para facilitar la comunicación inalámbrica entre dispositivos. Estos módulos pueden transmitir datos a través de internet o proporcionar información sobre la ubicación del sensor mediante una tarjeta controladora. Esta comunicación inalámbrica es fundamental para la operación eficiente de sistemas de monitoreo y control en diferentes aplicaciones, permitiendo obtener datos en tiempo real.

1.4.3.3.5 Tarjeta controladora Raspberry Pi. La Raspberry Pi es una tarjeta controladora utilizada en IoT. Funciona como un ordenador pequeño y se adapta con componentes para ser una computadora completa. Destaca por su procesador ARM Cortex-A72, RAM de 1,5GHz, Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet, puertos GPIO, HDMI, USB 2.0/3.0, y procesamiento gráfico Video Core VI con OpenGL ES 3.x. Su versatilidad la hace idónea para conectar dispositivos y ejecutar aplicaciones visuales y análisis de datos eficientes. Entre sus principales características técnicas se resumen en la tabla 6.

Tabla 6

Especificaciones técnicas Raspberry Pi.

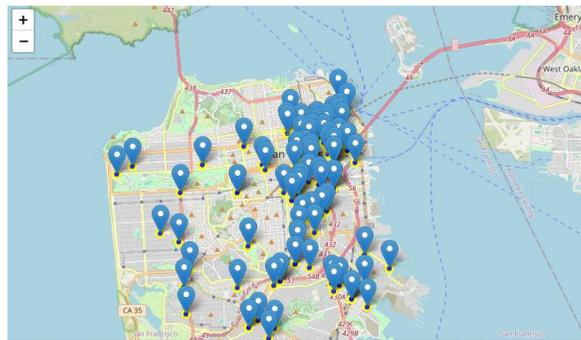
Especificaciones	Raspberry Pi 4
Procesador	ARM Cortex-A72
RAM	1,5GHz
Conectividad	Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet
Puertos.	GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0, 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry Pi), DSI (pantalla táctil), Micro SD Conector de audio Jack USB-C(alimentación)
GPU	Video Core VI (con soporte para OpenGL ES 3.x)

Fuente: Xataka (2019).

1.4.3.3.6 Interfaz de visualización. Python es una herramienta poderosa para visualizar datos a través de gráficos y mapas interactivos. Sus librerías facilitan el análisis, combinación y depuración de datos para una toma de decisiones precisa. La interfaz gráfica de Python, como se ve en la figura 14, ofrece modelos intuitivos para presentar datos de calidad en mapas, brindando una visión clara. También es práctico para cálculos y análisis eficientes de datos localmente en el servidor.

Figura 14

Modelo de interfaz gráfica en Python.



Nota: Presentación de modelos gráficos con la información deseada. Fuente: (Nursalam, 2016 & Fallis, 2013)

1.5 Metodología

1.5.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se llevó a cabo en este trabajo fue de naturaleza aplicada y se enmarcó en un estudio tecnológico. Se utilizaron teorías y principios para abordar el problema de la calidad del aire en la ciudad de Pasto a través de la aplicación de métodos y tecnologías específicas.

Se realizaron mediciones y análisis cuantitativos de las concentraciones de material particulado (MP) en diferentes lugares y momentos en la ciudad. Esto permitió obtener una visión detallada y objetiva de las condiciones y características del MP en términos de tiempo y espacio.

1.5.2 Paradigma de investigación

El paradigma utilizado en este estudio fue el cuantitativo, basado en la recolección y análisis de datos numéricos y cuantificables. Este enfoque cuantitativo permitió medir variables relacionadas con la concentración de material particulado, la precipitación, la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura ambiental en la ciudad de Pasto.

Además, se emplearon herramientas de visualización de datos para presentar los hallazgos de manera clara y comprensible, lo que facilitó la interpretación de los resultados por parte de los interesados y tomadores de decisiones.

1.5.3 Enfoque de investigación

Este estudio se basó en un enfoque de investigación cuantitativa, donde se recopilaron datos numéricos sobre las variables relevantes relacionadas con la calidad del aire en la ciudad de Pasto. Se utilizaron técnicas de muestreo aleatorio para seleccionar ubicaciones representativas en la ciudad, donde se midieron niveles de concentración de material particulado.

Los datos recopilados fueron sometidos a análisis estadístico para identificar patrones entre las diferentes variables. Se emplearon métodos estadísticos descriptivos para resumir los datos y presentar una visión general de la calidad del aire en la ciudad.

El enfoque cuantitativo permitió obtener resultados precisos y generalizables sobre la calidad del aire en la ciudad de Pasto, lo que contribuyó a comprender la magnitud del problema y respaldó la formulación de estrategias para mejorar la situación ambiental.

1.5.4 Diseño de ingeniería y desarrollo técnico

La figura 15 muestra la metodología del proyecto de investigación organizada en fases, mostrando las actividades que se realizarán. El estudio tendrá lugar en las calles de la ciudad de Pasto y las distintas ubicaciones donde se medirán los niveles de calidad del aire.

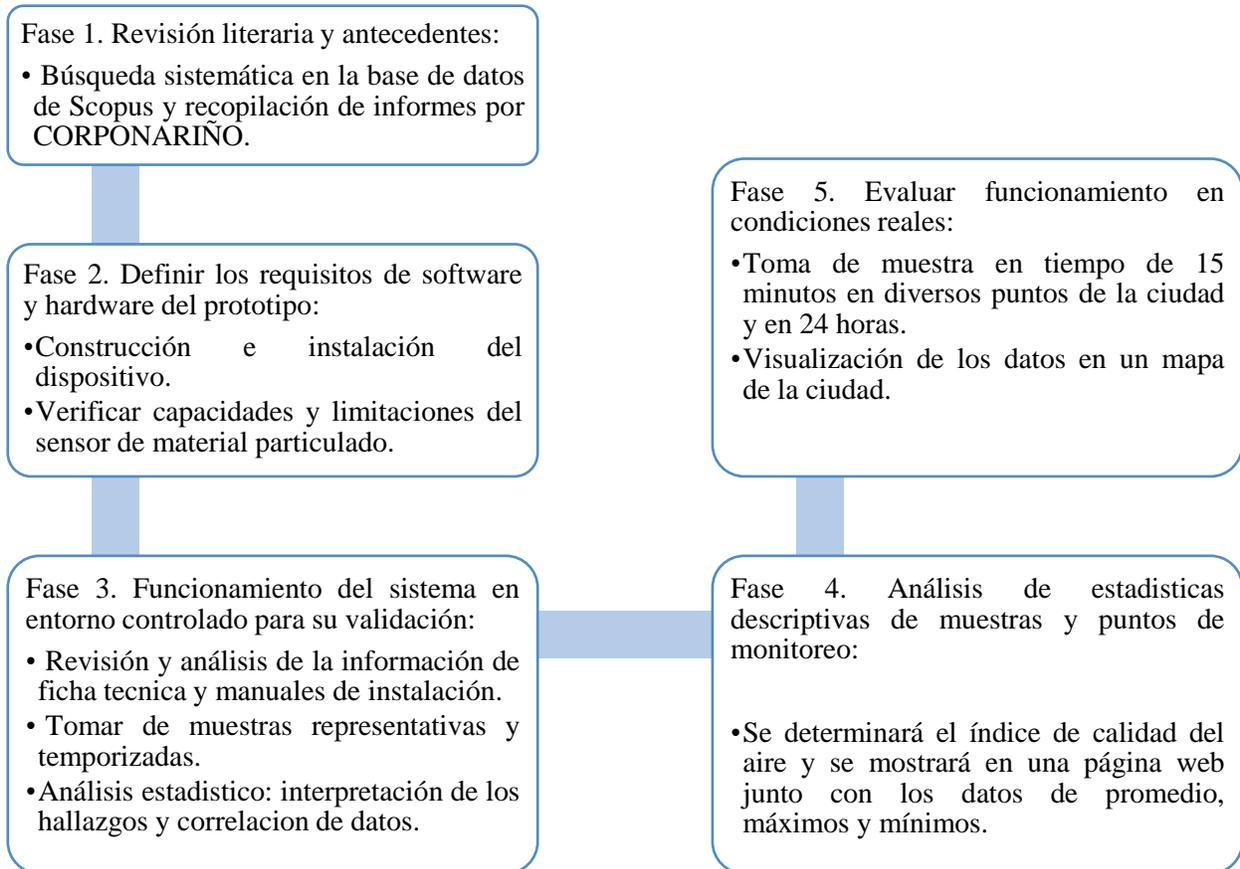
El análisis se basará en los datos obtenidos durante las mediciones, realizadas en intervalos de 10 minutos, durante lecturas de 15 minutos, entre las 2 p.m. y las 6 p.m. y periodos de 24 horas. El estudio se llevará a cabo en San Juan de Pasto concentrándose en rutas con alta concentración de contaminantes, donde se colocaron dispositivos de monitoreo para analizar las partículas PM10 y PM2,5.

Según las directivas, se considera instalar un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) por cada 150,000 habitantes en ciudades con poblaciones inferiores a 500,000 habitantes. Por consiguiente, la ciudad de Pasto estuvo dentro de este rango, al contar con una población de 472.729 habitantes, según el censo de 2021.

Cada fase se implementará con un enfoque cuantitativo para garantizar objetividad y precisión de los resultados.

Figura 15

Estructura metodológica



En la fase 1 de la investigación se llevó a cabo una búsqueda avanzada utilizando bases de datos en Scopus y la recopilación de informes de CORPONARIÑO presentados ante IDEAM en temas relacionados con la calidad del aire. Esta etapa fue crucial para obtener una comprensión profunda del problema y permitir identificar la partícula con mayor incidencia en la ciudad de Pasto. El análisis de esta información fue fundamental para enfocar el estudio de manera más precisa y establecer las bases para el desarrollo de las siguientes fases.

En la fase 2, se establecieron los requisitos del prototipo, como el controlador a utilizar y el modelo de tarjeta controladora. Además, se definieron los requisitos de instalación del sensor según las normas establecidas por las entidades públicas de medio ambiente en Colombia. Se construyó la estructura del sistema utilizando una impresora 3D, teniendo en cuenta el diseño del sensor y su ficha técnica de instalación. También se determinaron las alertas en función de la

concentración de material particulado y se seleccionó la ubicación para la captura de datos de incidencia de partículas, con el fin de crear un mapa interactivo de la ciudad utilizando la herramienta de Python. Una vez que el dispositivo fue ensamblado, se llevaron a cabo una serie de pruebas para evaluar su funcionamiento como prototipo IoT. En particular, se realizó una evaluación del funcionamiento del sistema de envío y recepción de datos en la nube. Esto permitió comprobar si el prototipo era capaz de transmitir la información recopilada de manera eficiente y segura.

En la fase 3 de la investigación, se llevó a cabo la recopilación de datos mediante pruebas experimentales y análisis estadístico descriptivo y correlacional. Para ello, se utilizó la ficha técnica del sensor SPS30 comparada con la ficha técnica del dispositivo Plantower PMS5003, la cual detallaba la precisión del dispositivo bajo ciertas condiciones. El objetivo fue obtener pruebas experimentales y comparar la precisión con el prototipo desarrollado. Asimismo, durante esta fase se realizó una comparación con dispositivos del laboratorio de la Universidad Mariana.

Durante estas pruebas, se tomaron lecturas de los datos durante un período de 10 minutos, mientras que, a su vez, se recogieron datos a través del método gravimétrico para determinar la concentración de material particulado entre los tres dispositivos.

Una vez completadas estas pruebas, se generó un informe detallado de las muestras obtenidas, aplicando técnicas estadísticas para evaluar la correlación y el sesgo estadístico de los datos. Esta fase fue crucial para validar la exactitud del prototipo desarrollado, así como para garantizar la confiabilidad de los datos recopilados durante el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Pasto.

En la fase 4 de la investigación, se procedió a implementar los resultados en un mapa de la ciudad de Pasto. Esta visualización en un mapa proporcionó una representación gráfica y accesible, permitiendo que el usuario final tuviera una comprensión clara de la calidad del aire en diferentes áreas de la ciudad a través de la gestión eficiente de los datos recolectados.

La fase 4 fue fundamental para asegurar que el prototipo funcionara adecuadamente y para

garantizar que los datos obtenidos fueran útiles para abordar la problemática de la calidad del aire en la ciudad.

La fase 5 consistió en la instalación del sistema en condiciones externas, teniendo en cuenta las normas de instalación para sistemas de monitoreo del aire en Colombia. Además, se publicaron las concentraciones de niveles de incidencia, así como la visualización de la información a partir de la recolección de los datos en un mapa interactivo de la página web.

Como resultado de la validación externa, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo del nivel promedio, máximo y mínimo de la incidencia del material particulado proporcionado por el prototipo. Esto permitió verificar el cumplimiento de hipótesis, es decir, medir la funcionalidad del prototipo.

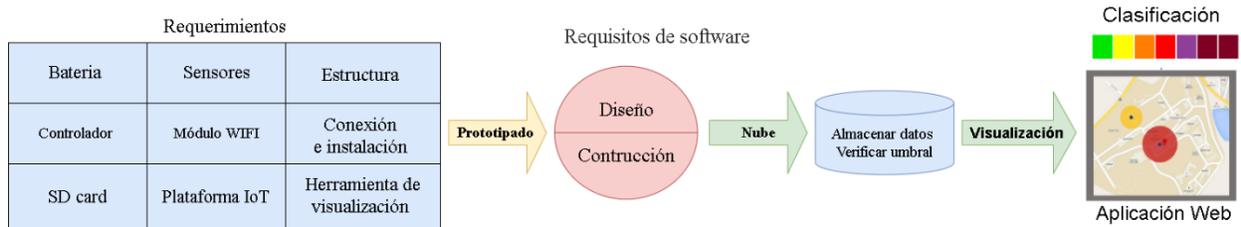
1.5.4.1 Especificaciones y requerimientos. Inicialmente, tal como se muestra en la figura 16 se identifican y definen los requerimientos técnicos esenciales, tales como el sensor y el controlador. Estos elementos constituyen los componentes básicos del sistema. Posteriormente, la atención se centra en los requerimientos de software, abarcando el proceso de prototipado desde el diseño hasta la implementación del sistema. Este esquema proporciona una guía a través de diversas fases en la evolución del prototipo.

Una vez establecidos estos requerimientos de software, se procede a la estructuración de los datos recabados. Estos datos son almacenados en una base de datos para su análisis posterior.

Luego, la información se presenta de manera accesible y comprensible en un mapa, permitiendo una visualización de los resultados obtenidos. Este enfoque asegura que los usuarios finales puedan interpretar fácilmente los datos y tomar decisiones informadas basadas en los mismos.

Figura 16

Diagrama del desarrollo del prototipo



Nota: El diagrama metodológico representa el flujo de trabajo para el desarrollo de la metodología del sistema, desde la identificación de requisitos técnicos hasta la presentación de información en un mapa. Este diagrama estructurado facilita la comprensión y ejecución del proceso de desarrollo del sistema. Fuente: *autor*.

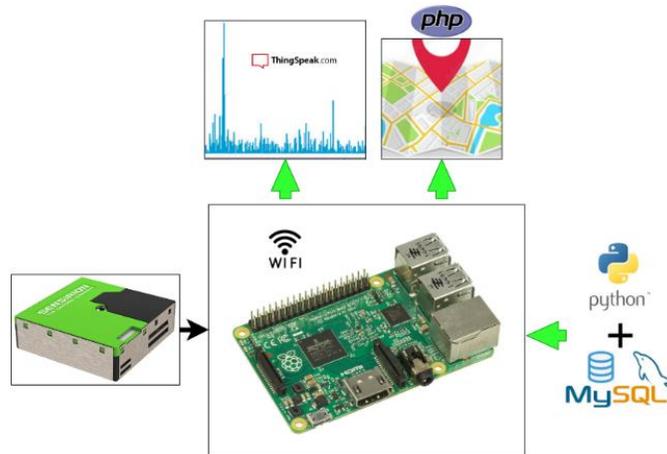
1.5.4.1.1 Diseño conceptual y detallado. La descripción gráfica del montaje del prototipo está compuesta principalmente por los siguientes elementos:

1. Sensor SPS30, el cual se comunica con Raspberry Pi a través del protocolo de comunicación serial UART y el envío de la información a través de los puertos TX y RX, con una fuente de voltaje de 5 V.
2. Tarjeta Raspberry Pi, es el cerebro del prototipo la cual conlleva a la integración del sensor, programación del sensor en lenguaje Python, creación de la base de datos, la creación de la página web y visualización de los datos.
3. Base de datos MySQL, corresponde a la estructuración y seguridad de los datos recolectados haciendo uso de la base de datos relacional.
4. Código en PHP, HTML y Java Script, para la visualización de la información en la página web.
5. Tecnologías IoT, utilizadas en aspectos de la visualización de los datos en tiempo real y la verificación y gestión remota de los datos.
6. Lenguaje de programación como Python para la visualización de los datos y programación del sensor.

Estos componentes se combinan para permitir la visualización de los datos en un mapa de la ciudad. Todo este montaje se puede apreciar en la figura 17.

Figura 17

Montaje del prototipo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto



Nota: El prototipo está compuesto por el sensor SPS30, la tarjeta Raspberry Pi. Utiliza una base de datos MySQL y código en PHP, HTML y Java Script para visualizar la información en la página web. Además, hace uso de tecnologías IoT para la gestión remota de los datos y el lenguaje de programación Python para representar los datos en un mapa de la ciudad. Fuente: autor.

1.5.4.1.2 Selección de componentes y materiales. La elección del sensor se fundamentó en una revisión bibliográfica, en el cual se destacaron los sensores NDIR de bajo costo debido a sus superiores características físicas, tal como se evidencia en las hojas de datos disponibles. Entre los atributos más notables de estos sensores se encuentran su alta resolución, larga vida útil y capacidad para operar de manera ininterrumpida durante 24 horas, sin requerir mantenimiento preventivo ni correctivo.

Para la selección del sensor, se tomaron como referencia investigaciones previas relacionadas con el monitoreo de material particulado. Se evaluaron diversos aspectos técnicos, incluyendo la instalación del sensor, así como características técnicas específicas como la resolución, el rango, el porcentaje de humedad y la tolerancia. Estos detalles se presentan en la tabla 7.

Tabla 7

Comparativa de las características de diversos sensores MP de bajo costo.

Modelo	UART	I2C	Modo detección	Estado
Honeywell HPMA115SO	Si	---	Auto	Obsoleto
Panasonic SN-GCJA5L	Si	Si	Auto	Vigente
Plantower Model	Si	---	Auto	Vigente
Nova SDS011	Si	---	Auto	Vigente
Sensirion SPS30	Si	Si	Select / Auto	Vigente

Nota: Las características de comunicación (UART, I2C) y el estado (Vigente, Obsoleto) de varios modelos de sensores fueron tomados de las fichas técnicas, su modo de detección se refiere a la detección manual o automática del MP. Fuente: https://github.com/kike-canaries/canario_sensorlib#readme.

Se eligió el sensor de la marca Sensirion, modelo SPS30, debido a las siguientes ventajas que presenta en comparación con otros sensores. Destacan su alta calidad y durabilidad, con una vida útil aproximada de 8 a 10 años. Además, ofrece una precisión notable en la medición de diversos diámetros de material particulado, con un rango de muestra que abarca desde 0 hasta 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El sensor también cuenta con una tolerancia de humedad del 80%, lo que lo hace adecuado para diversas condiciones ambientales. Sus dimensiones compactas de 41 x 41 x 12 milímetros facilitan su montaje e instalación en diferentes ubicaciones, como se detalla en la tabla 8.

Tabla 8

Especificaciones técnicas del sensor SPS30

Parámetro	Condiciones	Valor	Unidades
Precisión de la concentración de masa PM2.5	0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rango de concentración de masa	-	0-1000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución de concentración de masa	-	1	μg
Rango de tamaño de concentración de masa	PM1,0-PM10	0,3 – 10,0	μg

Parámetro	Condiciones	Valor	Unidades
Vida útil	24 h/día	8	Años
Nivel de emisión acústica	0,2	25	dB(A)
Peso	-	26	g

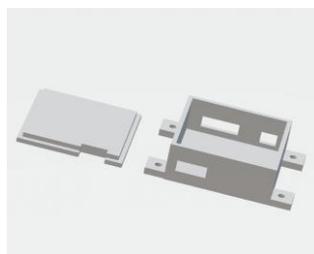
Nota: Estos parámetros son fundamentales para entender el rendimiento y las capacidades del sensor SPS30 en diversas condiciones de uso. Fuente: Sensirion (s. f.).

1.5.5 Proceso de implementación

En la construcción del prototipo, se asegura que el diseño realizado en impresión 3D en la figura 18, cumpla con los requisitos de validación externa, garantizando así el cumplimiento del manejo responsable del sensor y cumpliendo con los criterios de instalación.

Figura 18

Estructura en impresora 3D del sensor



Nota: El diseño en 3D impreso tiene el propósito de proteger la estructura del sensor y permitir su adecuada instalación y funcionamiento. Este enfoque se basa en las especificaciones detalladas proporcionadas en la ficha técnica del sensor. Fuente: Ficha técnica

Los criterios de instalación también están definidos sobre la base de la estructura ubicada a 2 metros de altura, siguiendo los criterios de instalación de calidad del aire de los sistemas de monitoreo establecidos en la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente (MINAMBIENTE). Para cumplir con este requisito, se diseñó una estructura con estas medidas, tal como se observa en la figura 19.

Figura 19

Montaje del prototipo en estructura metálica para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Pasto



En cuanto a la ubicación óptima del sensor, se eligió de acuerdo con la ficha técnica y la revisión de su documentación, se determinó como la más adecuada para el monitoreo tal como se ilustra en la figura 20.

Figura 20

Montaje del prototipo en estructura impresa en 3D.

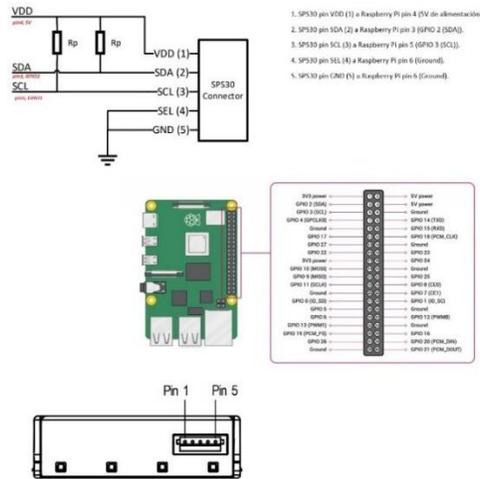


Nota: El montaje adecuado del prototipo del sensor SPS30 requiere seguir las siguientes recomendaciones: a. Instalar el sensor de forma vertical. b. Proporcionar aperturas grandes para una adecuada exposición directa al medio ambiente. c. Evitar exposición directa de la luz solar sobre el sensor. Estas directrices se basan en la ficha técnica del sensor y son fundamentales para asegurar un funcionamiento óptimo y mediciones precisas del dispositivo. Fuente: Ficha técnica.

1.5.5.1 Construcción del prototipo. El montaje de los componentes electrónicos parte de la conexión del sensor SPS30 a Raspberry Pi como se indica en la figura 21.

Figura 21

Diagrama de conexión SPS30 a Raspberry Pi

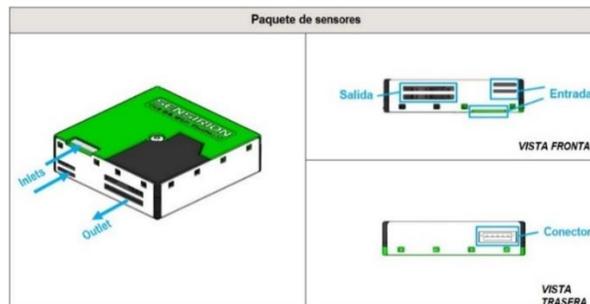


Nota: conexión física de SPS30 a través del puerto serial UART. Fuente: github.com/UnravelTEC/Raspi-Driver-SPS30

Posteriormente, se ensambló el dispositivo y se revisó la documentación del sensor, la cual incluye un apartado sobre cómo debe ser respetada su instalación para evitar conflictos con su funcionamiento. Esto implica respetar las entradas y salidas de aire del sensor, como se puede apreciar en la figura 22.

Figura 22

Diseño mecánico de los ventiladores del sensor SPS30.



Nota: Es importante respetar la entrada y salida de aire en el diseño de la estructura física del sensor SPS30, según indica la ficha técnica del sensor. Fuente: Ficha técnica

La construcción de una estructura en 3D es fundamental para asegurar el correcto montaje del sensor sobre su base.

Figura 23

Ensamble del sensor SPS30 sobre su estructura.



1.5.5.2 Integración de sistemas. La integración del sensor a la Raspberry Pi comienza con la integración de Raspberry pi a VNC siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Se establece conexión SSH en la Raspberry Pi.
- 2) Acceder a la interfaz de línea de comando (CLI).
- 3) Utilizar un servidor VNC en Pi4 para conexión remoto.

VNC (virtual network computing) permite visualizar la pantalla del dispositivo (servidor) en otro sistema (cliente).

La instalación de VNC es remota, utilizando los siguientes comandos:

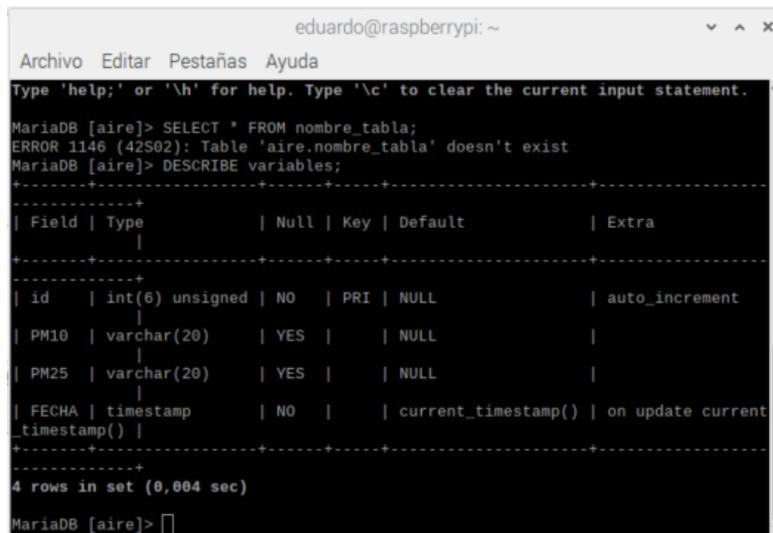
- `sudo apt-get update`
- `sudo apt-get install realvnc-vnc-server`
- `sudo apt-get install realvnc-vnc-viewer`

Una vez se encuentre activa la conexión VNC desde Raspberry Pi tenemos acceso a la IP desde el computador. Permitiendo el control de manera remota del dispositivo.

Posteriormente, la integración de la base de datos MySQL en la Raspberry Pi permite la gestión y almacenamiento seguro de los datos recolectados. La Figura 24 ilustra la creación de la base de datos, haciendo uso de comandos SQL. Luego se definen las tablas dentro de la base de datos para estructurar el almacenamiento de las dos variables, asegurando así una organización eficiente de la información.

Figura 24

Creación de la base de datos MySQL en la terminal de Raspberry Pi.



```
eduardo@raspberrypi: ~
Archivo Editar Pestañas Ayuda
Type 'help;' or '\h' for help. Type '\c' to clear the current input statement.
MariaDB [aire]> SELECT * FROM nombre_tabla;
ERROR 1146 (42S02): Table 'aire.nombre_tabla' doesn't exist
MariaDB [aire]> DESCRIBE variables;
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| Field | Type          | Null | Key | Default         | Extra          |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| id    | int(6) unsigned | NO   | PRI | NULL            | auto_increment |
| PM10  | varchar(20)     | YES  |     | NULL            |                |
| PM25  | varchar(20)     | YES  |     | NULL            |                |
| FECHA | timestamp       | NO   |     | current_timestamp() | on update current_timestamp() |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
4 rows in set (0.004 sec)
MariaDB [aire]> 
```

Así mismo, se ha realizado la Integración de la plataforma Thingspeak para el monitoreo en tiempo real de las partículas de material particulado. A través del envío de datos mediante la API de Thingspeak, se logra una conexión directa, permitiendo la visualización de los datos. La figura 25 ilustra esta integración.

Figura 25

Integración de la plataforma Thingspeak mediante el envío de datos a través de su API



Por último, la figura 26 muestra la integración de la página web local para la visualización del mapa de la ciudad y la presentación de resultados a través de una interfaz intuitiva permitiendo visualizar de manera clara los datos en forma de gráficos y el mapa de la ciudad.

Figura 26

Integración de la página web local para la visualización del mapa de la ciudad y la presentación de resultados



1.5.5.3 Programación y control. La sección de control y programación del sensor se realiza utilizando la librería de Github que tomada de la página <https://github.com/UnravelTEC/Raspi->

Driver-SPS30, la cual relaciona un documento muy completo de las pruebas llevadas a cabo con este sensor, a partir de ello hemos programado nuestro sensor adecuándolo al objetivo de medir material particulado PM10 y PM2.5, de tal forma que se le integró la base de datos para guardarlos, y por otra parte el envío de los datos a plataformas IoT.

También es importante destacar la programación del sensor PMS5003 el cual fue un punto de referencia para basarnos en la toma de datos y correlacionarlos.

1.5.6 Plan de pruebas y validación

El proceso de planificación involucró la realización de pruebas utilizando el método gravimétrico como base para garantizar la calidad de los datos. La calibración interna fue influenciada por equipos como Dustrak, que facilitó la captura precisa de concentración de material particulado tanto para PM10 como para PM2.5 a través de sus filtros y dispositivos.

Se llevaron a cabo pruebas de monitoreo en puntos estratégicos de la ciudad para la validación externa, lo que permitió la comparación de resultados en distintos entornos y condiciones atmosféricas. Esto proporcionó una visión general de la calidad del aire considerando las posibles variaciones temporales y por ubicación.

1.5.6.1 Pruebas y funcionamiento. Las pruebas llevadas a cabo implicaron el uso de un dispositivo y un método que permitieron medir la correlación de los datos. En este caso, se utilizó el método gravimétrico, una técnica comúnmente empleada para medir la concentración de material particulado en el aire.

El principio de funcionamiento del método gravimétrico se basa en el muestreo gravimétrico, que consiste en capturar partículas suspendidas en el aire en un filtro durante un periodo de tiempo determinado. Para llevar a cabo este proceso, se necesitó un filtro capaz de capturar las partículas, así como el equipo Dustrak para el muestreo, que incluye un caudal constante que permite medir el flujo de aire en litros por minuto (L/min) y el muestreador de partículas para PM10 y PM2.5.

El procedimiento básico del método gravimétrico implica fijar el filtro al equipo de muestreo y permitir que el aire fluya a través de él durante un periodo de 10 minutos. Una vez finalizado el proceso de muestreo, se retira el filtro y se pesa con precisión. La diferencia entre el peso inicial del filtro limpio y el peso final con el material particulado capturado proporciona la cantidad de material particulado en el aire durante el tiempo de muestreo.

La fórmula para calcular la concentración de material particulado en el aire es Ecuación 1.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Peso del material particulado (mg)}}{\text{Volumen de aire muestreado (m}^3\text{)}} \text{ (Ecuación 1)}$$

En este caso, al trabajar con caudal expresado en litros por minuto, se debe convertir a metros cúbicos dividiendo por 1000 (1L = 0.001 m³) y multiplicando por el tiempo de muestreo en minutos.

Por ejemplo, el muestreo de 10 minutos a un caudal de 2.43 L/min:

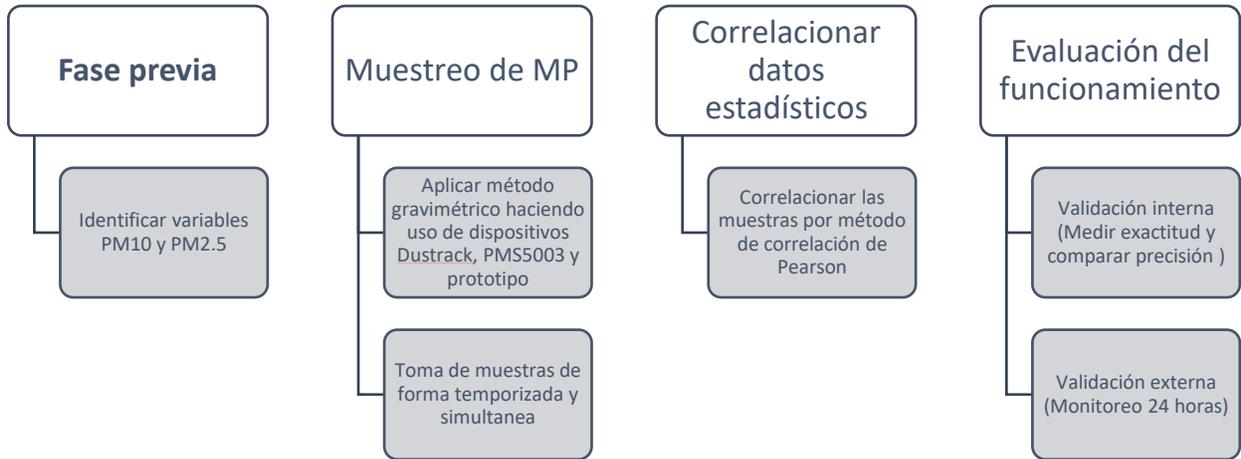
$$\text{Volumen de aire muestreado} = \frac{2.43 \text{ L/min} \times 10 \text{ min}}{1000} = 0,0243 \text{ m}^3 \text{ (Ecuación 2)}$$

Luego, al utilizar la fórmula anterior, se puede calcular la concentración de material particulado en el aire en miligramos por metro cúbico (mg/m³).

1.5.6.2 Verificación y validación de resultados. En la presente investigación, se emplearon técnicas de validación interna, que permiten asegurar la calidad y confiabilidad de los datos recopilados durante el proceso de estudio. El diagrama de bloques de validación interna se presenta en la figura 27 y representa el flujo de actividades que conducen a la obtención de la información. El proceso de validación interna incluye la revisión y depuración de datos, la comparación de resultados con otros dispositivos y la verificación de la coherencia de los datos obtenidos con la teoría. Esta técnica garantiza la integridad y consistencia de los datos.

Figura 27

Diagrama de validación interna



Para la lectura de los datos, se realizó en intervalos de tiempo determinados durante el día, tomando muestras cada 10 minutos a partir de intervalos de 15 minutos con el sensor. Estos intervalos de tiempo serán seleccionados entre las 8:00 am y las 12:00 pm, y entre las 2:00 pm y las 6:00 pm.

El análisis de la correlación del prototipo obtenido como resultado de la validación interna, permitió verificar el cumplimiento de la hipótesis planteada. En otras palabras, se evaluó la precisión y exactitud del prototipo en comparación con el equipo comercial PMS5003 y el de Alvernia, lo que resulta fundamental para asegurar la fiabilidad de los resultados del estudio de calidad del aire.

La fase de validación externa inicia con la evaluación del muestreo del prototipo en ambientes externos. Para ello, se procedió a la instalación del dispositivo en campo abierto, siguiendo las normas colombianas de sistemas de monitoreo de aire. Esta instalación se llevó a cabo en sitios previamente definido para su implementación, garantizando la representatividad de las condiciones reales del entorno.

Durante la validación externa, se realizó la toma de datos de manera continua, abarcando las

24 horas del día. Este enfoque permitirá obtener información sobre el comportamiento del prototipo en diferentes momentos del día y en distintas situaciones ambientales. La evaluación en periodos extensos de tiempo es esencial para comprender la capacidad del prototipo para mantener su exactitud en diversas condiciones atmosféricas y climáticas.

La validación externa resalta la importancia de realizar este procedimiento para asegurar la precisión y confiabilidad del prototipo en situaciones reales. Esta validación ofrecerá información relevante sobre el rendimiento del dispositivo en la monitorización de la concentración de material particulado y otros aspectos relacionados con la calidad del aire. Estos datos respaldarán los resultados de la investigación y generarán confianza en la efectividad del prototipo.

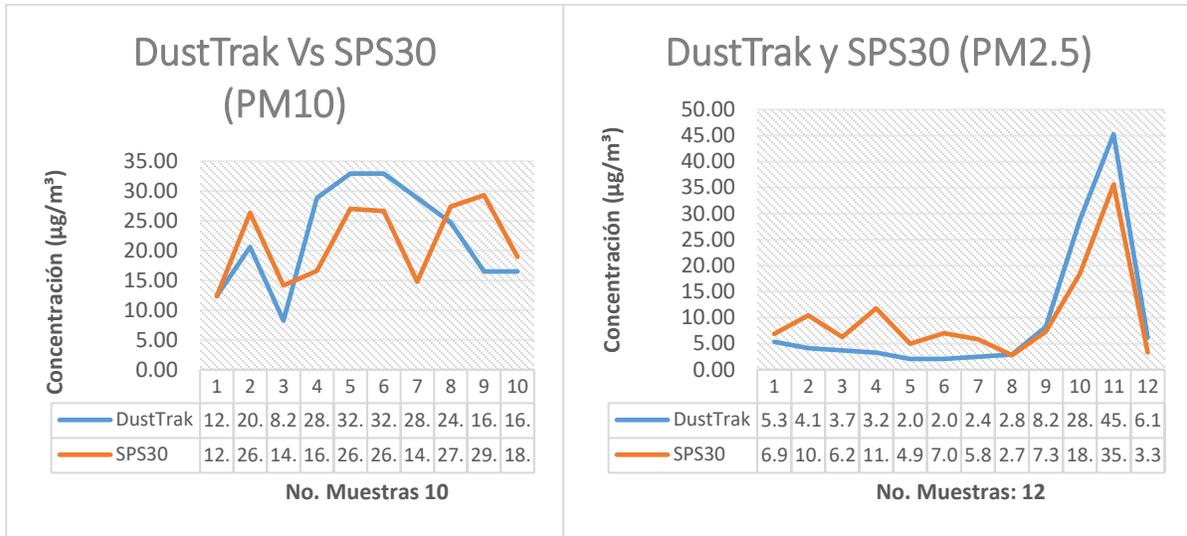
1.5.6.3 Instrumentos de investigación. En la selección del instrumento de medición directa, se dará especial atención a aspectos fundamentales, respaldados por investigaciones previas. La seguridad y autenticación de usuario serán prioritarios para asegurar la integridad del dispositivo y la confidencialidad de los datos recolectados. Asimismo, se evaluará la plataforma IoT utilizada, enfocándose en su capacidad para almacenar y gestionar grandes volúmenes de datos de manera eficiente y segura.

Para las mediciones de calidad del aire, se empleará el sensor de polvo SPS30, previamente calibrado para garantizar una precisión en la medición. A modo de ilustración, el sensor cuya hoja técnica indica una alta precisión ($\pm 10\%$) para la medición de material particulado inferior a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) y una precisión de ($\pm 25\%$) con un diámetro inferior a 10 micrómetros (PM₁₀). Se llevó a cabo una experimentación para comparar este sensor con el dispositivo comercial DUSTTRAK 2 y evaluar su rendimiento en distintas concentraciones de partículas figura 28.

Estos criterios de selección asegurarán que el sistema de medición directa sea confiable, preciso y capaz de obtener datos precisos sobre la calidad del aire en la ciudad de Pasto.

Figura 28

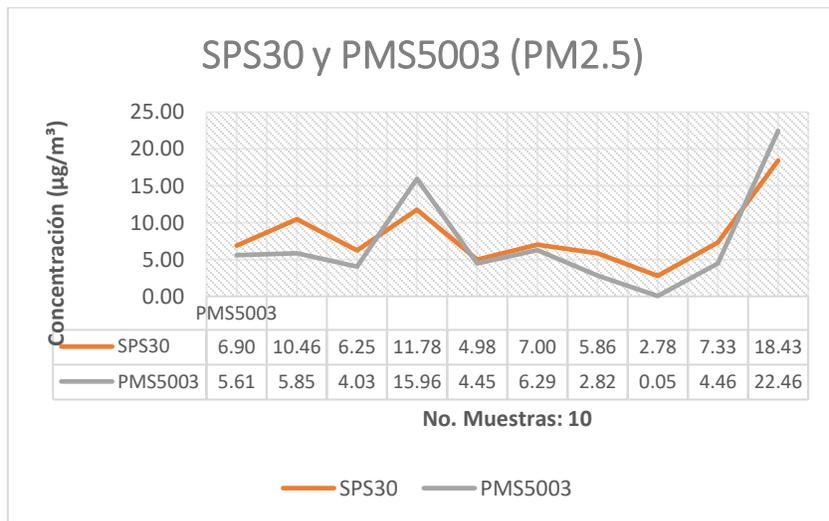
Resultados de calibración del SPS30 por método gravimétrico para PM10 y PM2.5



Nota: la tendencia de las concentraciones diarias obtenidas por los dos equipos presentó comportamientos similares, coincidiendo en los picos en la medición realizada en un laboratorio controlado. Esto permitió correlacionar el sensor SPS30 con la diferencia de polvo capturado en 22 muestras de 10 minutos en comparación con el dispositivo de Alvernia, tanto para el polvo PM2.5 como para PM10.

Figura 29

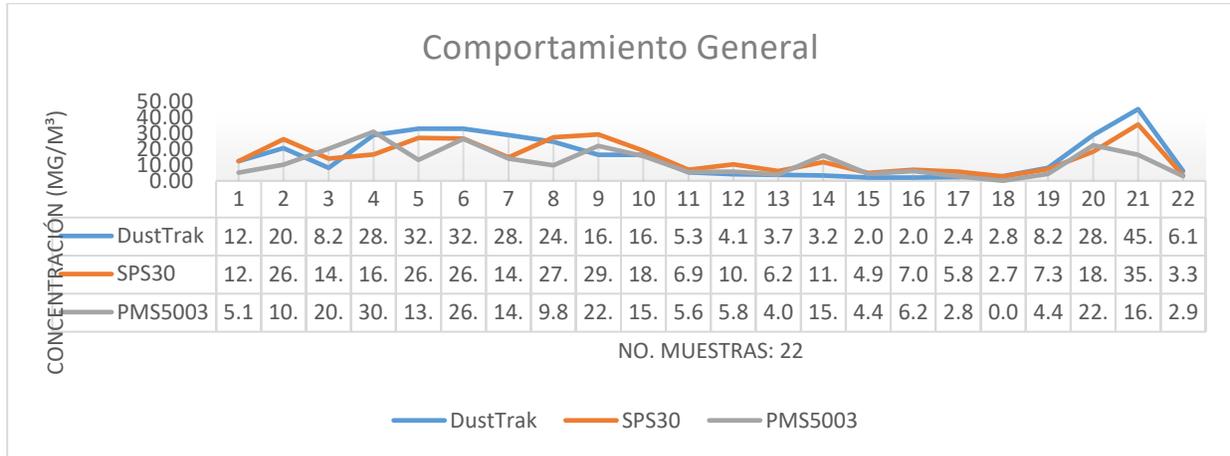
Resultados de calibración del SPS30 y PMS5003 por método gravimétrico



Nota: se presenta la precisión obtenida en la medición realizada en laboratorio controlado para calibrar el sensor con la diferencia de polvo capturado en 10 minutos en comparación frente a dispositivo de Alvernia.

Figura 30

Resultados de calibración del SPS30 y PMS5003 y laboratorio por método gravimétrico



En este caso se concluye que para sensores de polvo de bajo costo en el momento de su calibración presentaran una resolución más baja o un error por la diferencia de que un dispositivo comercial es más robusto, y una precisión mejor en cuanto a si mismo sin embargo los sensores de bajo costo, no están alejados de la realidad, tal cual como se observó en la gráfica anterior, y que además son sensores que vienen evolucionando constantemente y que serán el futuro del monitoreo de calidad de aire.

El dispositivo comercial de análisis de material particulado, DUSTTRAK 2, con el que se comparó presenta buena resolución, caudal y precisión, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9

Especificaciones técnicas

Equipo comercial DUSTTRAK		
Resolución	Caudal	Precisión de caudal

±0,1% de lectura de 0,001 mg/m ³ , el que sea mayor	3,0 l/min establecido en fábrica, 1,40 a 3,0 l/min, ajustable por el usuario	±5% del punto de ajuste de fábrica, flujo interno controlado
--	--	--

Nota: tomado de hoja de especificaciones <https://bit.ly/3MqTdvv>

Por otra parte, se consideraron las bases de datos históricas de IDEAM sobre material particulado y los datos de CORPONARIÑO recogidos en el día sin moto y carro para los periodos 2017 y 2018 como instrumentos de medición directa. Sin embargo, no fue posible obtener esta información a pesar de haberla solicitado a las entidades correspondientes.

En cuanto a la selección de sensores sobre la métrica de la tolerancia de error a tener en cuenta como primer criterio de selección, se ha tomado como referencia la investigación basada en un *Brochure lower – cost sensors*, que lleva por título lo siguiente *Measuring air pollution with low cost sensors. Throuhts on the quality of data measured by sensors*. Tomado de <https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/Brochure%20lower-cost%20sensors.pdf>.

Esta publicación explica los diversos tipos de sensores y que el material particulado es el componente criterio que se usa y está directamente relacionado con el deterioro de la calidad de aire, calidad ambiental y de salud.

Según esta investigación, explica cuál es la calidad de datos puede tomar estos sensores, a lo cual responde que la calidad de los resultados del sensor depende de la tecnología y la implementación (aplicación, sitio, condiciones, configuración). De esta manera, es difícil reproducir las respuestas de los sensores en diferentes sitios de medición o el uso portátil de sensores. Debido a la influencia de los parámetros meteorológicos en la señal de un sensor, no siempre es posible una corrección y/o calibraciones sencillas. Sin embargo, en ciertas situaciones bien definidas, la incertidumbre de medición de estos dispositivos puede acercarse al nivel de los métodos de medición "oficiales".

Otro artículo para tener en cuenta al seleccionar el tipo de sensor de polvo toma como resultado la evaluación de 12 sensores de material particulado (PM) que miden partículas inferiores a 2,5 micrómetros, los cuales son probados en condiciones externas ambientales con

respecto a una estación de monitoreo ambiental. Durante 3 años 6 de los 12 sensores con valores promedio de $R^2 \geq 0,70$ para concentraciones de PM 2,5 inferiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para este subconjunto el error absoluto medio (MAE) osciló entre 4,4 y $7,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En conclusión, se debe tener precaución al interpretar los datos de estos sensores. Además, esta investigación afirma que la humedad relativa es un factor importante de medir ya que causa impacto sobre el rendimiento del sensor y poder caracterizar MP del entorno ambiental (Feenstra et al., 2019).

Por otra parte, a partir de la publicación web se puede evidenciar el trabajo experimental que se han sometido algunos sensores en especial de la marca Plantower PMS5003 como los más conocidos en la actualidad, figura 31.

Figura 31

Evaluación experimental de sensores

Identificación del sensor/especie	Tiempo de actualización	pm25	pm10	pm1	db5.0-um	db2.5-um	db10.0-um	db1.0-um	db0.5-um
pms7003 #1	27 de octubre de 2021 19:41 hace 4 meses	9.8	10.3	8.5	0.4	1.8	0.4	22.6	569.4
pms5003 #4 (antiguo)	27 de octubre de 2021 19:40 hace 4 meses	77.3	88.1	57.9	0	0	0	200.3	1919.5
pms5003 #5	27 de octubre de 2021 19:39 hace 4 meses	15.5	15.5	12	0	0	0	45.1	255.1
pms7003 #2	27 de octubre de 2021 19:30 hace 4 meses	4.7	4.8	3.9	0	0.8	0	23.3	240.4
pms7003 #3	27 de octubre de 2021 19:27 hace 4 meses	6.4	7.4	5.4	0.8	3.4	0.1	28.3	308.6
pms5003 #2	14 de junio de 2021 3:55 a. m. hace 8 meses	47.2	62.3	31.5	8.6	40.5	3.3	380.1	2112.5
pms5003 #1	14 de junio de 2021 3:54 a. m. hace 8 meses	43.1	58.8	28.6	18.9	50.3	3.4	410.2	2232.7
pms5003 #3	14 de junio de 2021 3:52 a. m. hace 8 meses	35.3	47.1	23.6	11.8	38.3	3.9	436.2	2311.3

Nota: evaluación de sensores para diferentes diámetros de material particulado en el tiempo con diferentes sensores. Fuente: <https://aqicn.org/sensor/pms5003-7003/>

2. Presentación de resultados

2.1 Análisis e interpretación de resultados

2.1.1 Análisis del primer objetivo

El objetivo de desarrollar un prototipo de monitoreo automático y portable para medir material particulado MP10 y MP2,5 en San Juan de Pasto se logró mediante el cumplimiento de requisitos de hardware y criterios de instalación. Esto resultó en un prototipo funcional que garantiza la precisión y fiabilidad en la medición de concentraciones de material particulado.

A continuación, se presenta el prototipo instalado en la base metálica, con su correspondiente estructura de protección del sensor. En la figura 32 se puede apreciar claramente cómo está ubicado y conectado.

Figura 32

Instalación del prototipo sobre su base metálica superior a 2 metros de altura



Nota: Se evidencia el uso del criterio de instalación mencionado por los manuales de operación e instalación de los sistemas de vigilancia de calidad del aire para la obtención de muestras representativas.

2.1.2 Análisis del segundo objetivo

La figura 33 muestra la integración de la plataforma IoT para el monitoreo de la calidad del aire, permitiendo así la verificación en tiempo real a través de la plataforma ThingSpeak y la página web.

Figura 33

Integración de plataforma IoT para indicar la calidad del aire en la página web personalizable con PHP.



Nota: la página web muestra la cantidad de material particulado mediante una gráfica de las variables PM10 y PM2.5. Fuente: *autor*.

2.1.3 Análisis del tercer objetivo

Se realizó un análisis de 22 muestras con filtros utilizados para analizar y recolectar concentración de polvo del equipo de monitoreo de aire de los laboratorios de la universidad Mariana. Cuyo fin fue determinar cantidad de material particulado registrado por el prototipo y cantidad de partículas utilizando un método gravimétrico para la medición de material particulado. en este método se utiliza un filtro para capturar las partículas presentes en un flujo de aire o gas a través de un sistema de muestreo. Luego, se pesa el filtro antes y después de la exposición del flujo para determinar la cantidad de material particulado acumulado.

Para calcular la cantidad de material particulado por medio del peso de los filtros, se siguió este proceso:

1. Selección de los filtros: en este método debe ser un filtro capaz de retener las partículas de interés sin que se pierdan a la hora del proceso de pesaje.
2. Calibrar el caudal del equipo Dustrak y prototipos antes de comenzar el muestreo y de pesaje.
3. Iniciar el muestreo: con el sistema de muestreo en funcionamiento el aire o gas pasa a través del filtro durante un tiempo determinado, medido en minutos.
Durante este tiempo, las partículas se depositan en el filtro y el prototipo simultáneamente también estará registrando los datos durante ese tiempo.
4. Retirar el filtro después del tiempo de exposición al flujo, cuidadosamente el filtro del sistema de muestreo.
5. Pesaje del filtro utilizando el equipo de laboratorio de química en este caso la balanza calibrada para obtener un pesaje preciso, se pesa el filtro que capturo las partículas. Se anotó el peso inicial y final del filtro.
6. Calcular la cantidad de material particulado entre la diferencia entre el peso final y el peso inicial del filtro el cual corresponde a un peso del material particulado capturado durante el muestreo. Esta diferencia se expresa en microgramos o miligramos.

Los resultados estadísticos encontrados fueron la correlación de los datos y podemos ver que existe una correlación positiva para los datos tomados entre el método gravimétrico y el del prototipo según la tabla 10:

Tabla 10

Correlación de medidas tomadas en laboratorio de Alvernia

Correlación Dustrak y SPS30	0.796626287	Pearson	0.845939135
Correlacion SPS30 y PMS5003 (PM2.5)	0.448154178	Pearson	0.448154178
Correlación Dustrak y PMS5003	-0.057198343	Pearson	0.517406932

Las pruebas muestran una fuerte correlación lineal positiva entre el sensor SPS30 y el método gravimétrico, con mediciones similares y estrechamente relacionadas. En cambio, la correlación entre el sensor PMS5003 y el método gravimétrico es débil y negativa.

Tabla 11

Desviación estándar y sesgo de SPS30 y equipo de laboratorio de Alvernia

Desviación estándar DusTrak:	2.30
Desviación estándar SPS30:	5.45
Sesgo promedio:	0.12

Nota: Al comparar las desviaciones estándar del Dustrak y del prototipo SPS30 (2.30 y 5.45 respectivamente), podemos inferir que el SPS30 tiene una mayor dispersión de los datos en comparación con el Dustrak.

Sesgo promedio (0.12), ambos dispositivos tienden a producir mediciones que están cerca unas de otras en promedio, sin una diferencia sistemática significativa.

2.1.4 Análisis del cuarto objetivo

La figura 34 representa el mapa con los indicadores de calidad del aire de los puntos de monitoreo, cada uno con su respectivo marcador que indica el nivel de incidencia de concentración de material particulado (MP).

El mapa de la ciudad es interactivo y muestra información de los puntos de monitoreo, tales como la dirección y coordenadas, el valor máximo y mínimo de concentración de material particulado (MP) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y su promedio estadístico.

Figura 34

Indicadores de calidad de aire de los puntos de monitoreo con su respectivo marcador que indican el nivel de incidencia de concentración de MP.



Nota: los indicadores de calidad del aire se representan mediante colores. En este caso, el color verde indica un nivel bajo de incidencia de concentración de material particulado.

A continuación, se presenta la tabla 12 con los puntos de monitoreo, sus respectivas coordenadas geográficas para su identificación exacta:

Tabla 12

Ubicación de los puntos de monitoreo

Puntos de monitoreo	Coordenadas latitud y longitud	Dirección
1. Hotel Morasurco	1,2314885, -77,2832774	Calle 22 Cra. 41
2. Parque Versalles	1,224060, -77,281937	Carrera 33 Calle 19
3. Museo Madre Caridad Brader	1,220995, -77,283231	Calle 16B Cra. 32A
4. Seguridad del Sur	1,219889, -77,283487	Calle 21 Cra. 29
5. Parque Paraná	1,222668, -77,284886	Carrera 35 No. 17-68

Nota: Estos puntos de monitoreo han sido seleccionados estratégicamente para obtener una cobertura representativa de diferentes áreas de la ciudad y así realizar un seguimiento de la calidad del aire.

A continuación, se presenta la tabla 13 con el horario de monitoreo, indicando la fecha de inicio, el tiempo de inicio y fin, y la duración de medidas tomadas en cada intervalo.

Tabla 13

Tiempo de monitoreo con la fecha y hora

Fecha de monitoreo	Horario	Tiempo de monitoreo
31/10/2023	3:50 pm - 4:05 pm	15 minutos
31/10/2023	4:15 pm - 4:30 pm	15 minutos
31/10/2023	4:40 pm - 4:55 pm	15 minutos
16/03/2024	16/03/24 hasta 26/03/24	24 horas (10 días)
27/03/2024	27/03/24 hasta 17/04/24	24 horas (20 días)

Nota: Estos registros detallados del tiempo de monitoreo proporcionan información importante sobre la periodicidad y la duración de las mediciones realizadas en cada intervalo de tiempo especificado.

La tabla 14 muestra las variables ambientales locales las cuales pueden condicionar el índice de MP para los tres primeros puntos de monitoreo:

Tabla 14

Variables ambientales condicionantes

Temperatura Ambiente	Humedad Relativa	Velocidad del Viento	Precipitación
(°C)	(%)	(m/s)	(mm)
17	78%	10 SO	0,24
16	78%	10 SO	0,24
17	81%	10 S	0,24

Nota: Estos datos ambientales son fundamentales para comprender el entorno en el que se lleva a cabo el monitoreo de la calidad del aire y pueden influir en los resultados obtenidos.

La tabla 15 muestra las estadísticas obtenidas en los cinco puntos de monitoreo:

Tabla 15

Estadísticas obtenidas en los tres puntos de monitoreo

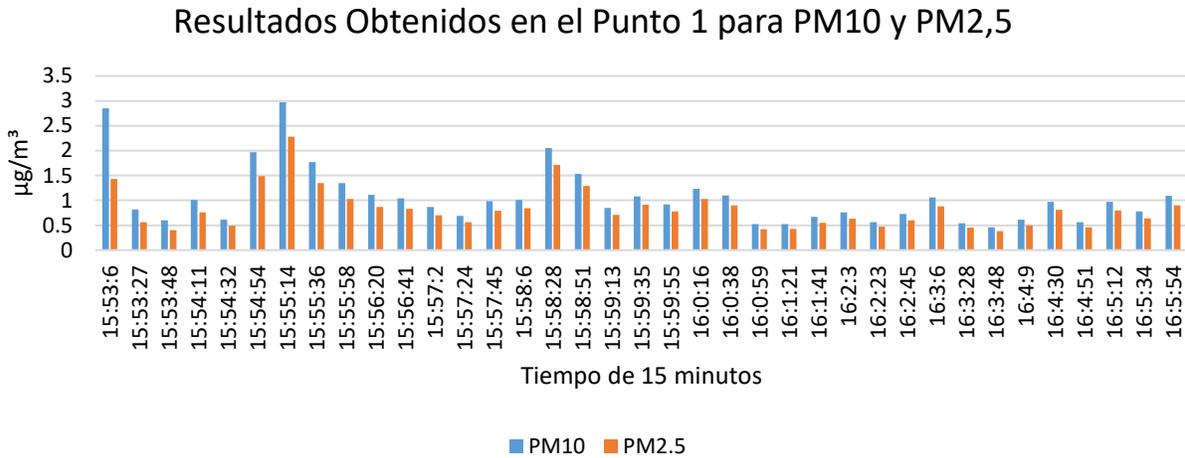
Sitio	Partícula MP	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	PM10	1,060	0,5	3,0
	PM2,5	0,828	0,4	2,3
2	PM10	0,969	0,2	1,4
	PM2,5	0,792	0,2	1,4
3	PM10	1,686	0,7	6,4
	PM2,5	1,674	0,7	6,4
4	PM10	13,65	6,42	21,83
	PM2,5	13,64	6,42	13,64
5	PM10	6,91	1,7	15,76
	PM2,5	6,91	1,69	15,76

Estas estadísticas proporcionan una visión general de los niveles promedio, mínimos y máximos de material particulado (PM10 y PM2,5) en cada punto de monitoreo, lo que es fundamental para evaluar la calidad del aire en diferentes áreas de la ciudad e identificación del contaminante.

A continuación, se muestra la observación de los datos recopilados para cada punto de monitoreo.

Figura 35

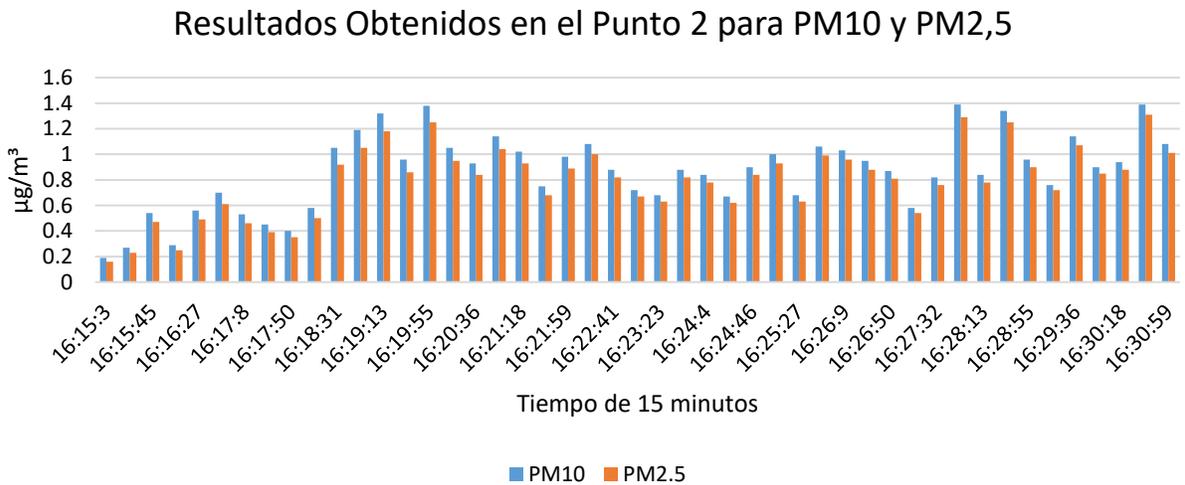
Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 1



Nota: Se realizó monitoreo en el sitio 1, durante un período de 15 minutos y presenta un valor máximo de 2.98 µg/m³ para PM10 y de 2.5 µg/m³ para PM2.5.

Figura 36

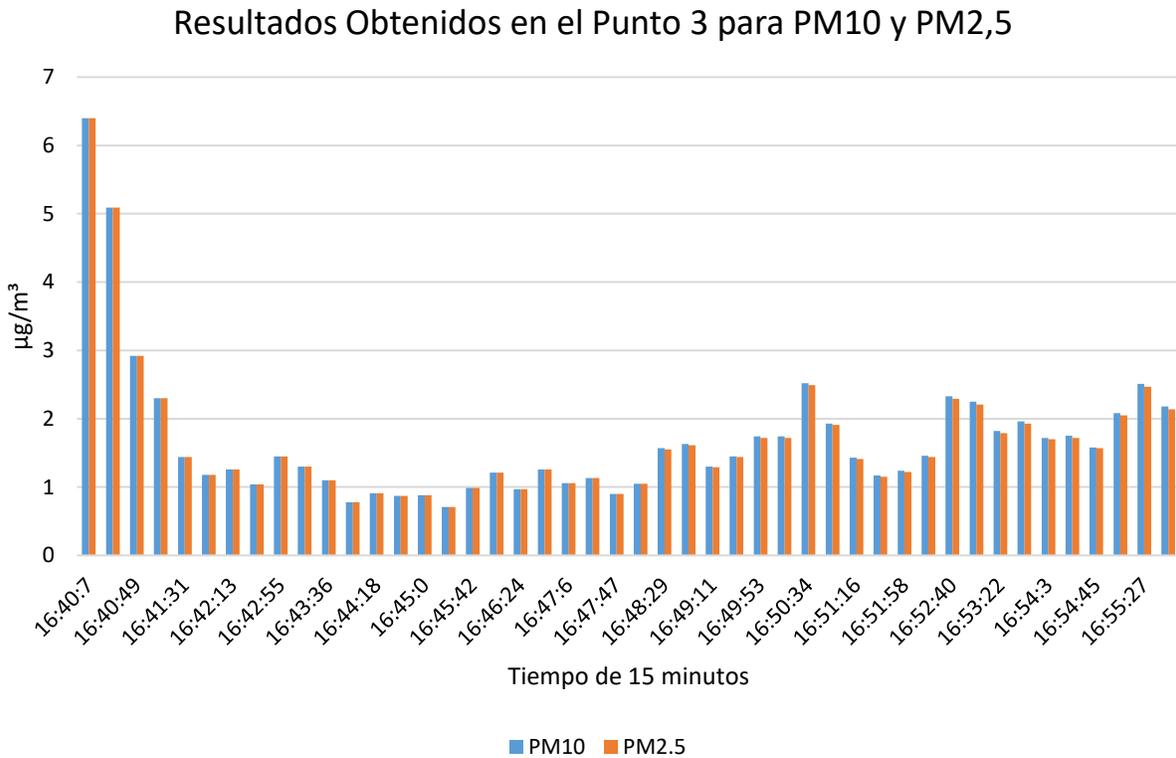
Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 2



Nota: Este punto de monitoreo en sitio 2, ubicado consecuentemente al anterior, se obtuvo en máximo de 1,39 µg/m³ para PM10 y de 1.31 µg/m³ para PM2.5 durante los 15 minutos de observación.

Figura 37

Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 3



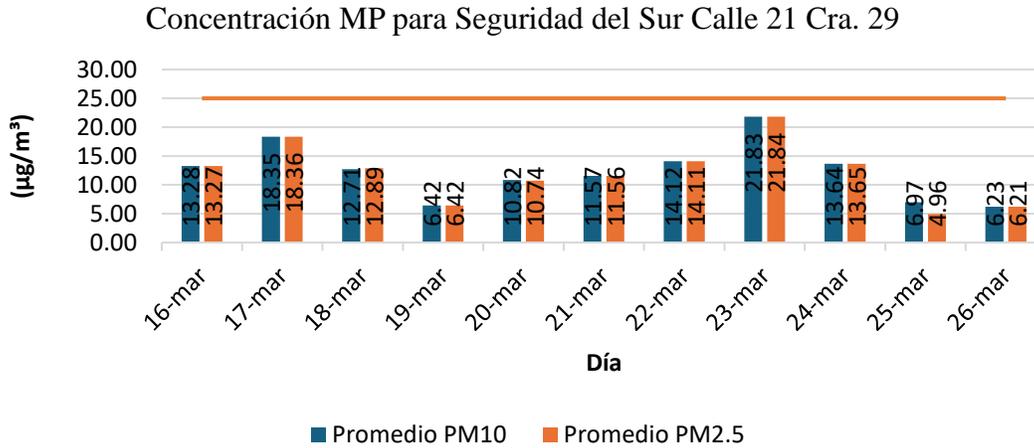
Nota: Este último punto de monitoreo, registró un valor máximo de 6,4 µg/m³ para PM10 y de PM2.5 durante el período de observación de 15 minutos.

El proceso de toma de datos durante 24 horas se indica a continuación, identificando que para el material particulado medido existen índices de calidad mucho más altos. Sin embargo, aunque estos índices no superan los límites establecidos, es un factor de incidencia que requiere cuidado y monitoreo continuo para visualizar su comportamiento en periodos largos.

Los resultados para el punto de monitoreo 4 de la figura 38 arrojaron un nivel máximo de 21.83 µg/m³ para partículas PM10 y 21.84 µg/m³ para PM2.5, indicándonos que puede superar o estar cercano a superar el límite permisible de material particulado en 24 horas.

Figura 38

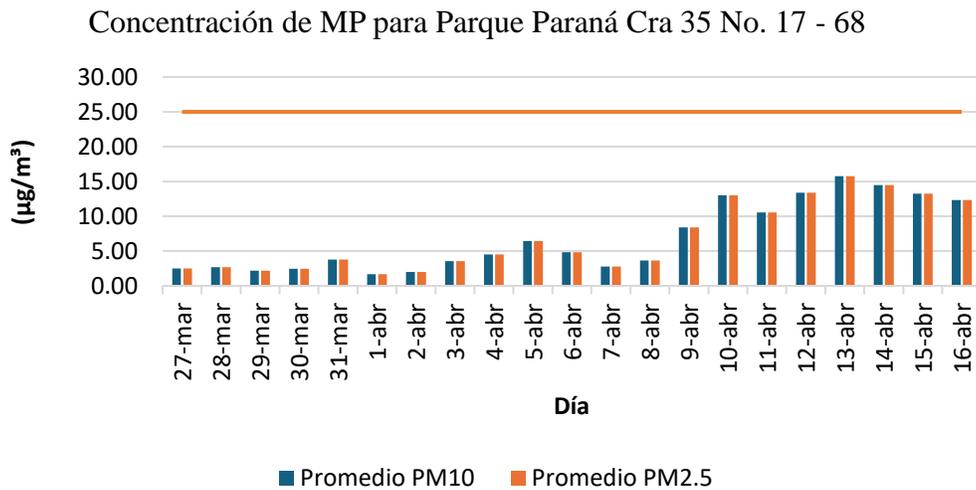
Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 4



Los resultados para el punto de monitoreo 5 de la figura 39 arrojaron un nivel máximo de 15.76 µg/m³ para partículas PM10 y PM2.5, con tendencia a superar o estar cercano a superar el límite permisible de material particulado en 24 horas.

Figura 39

Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 5



3. Conclusiones

Se desarrolló de manera efectiva un prototipo de monitoreo que utiliza Sensirion SPS30 con un sesgo promedio en comparación con otros dispositivos que fue de 0.12 y que permite integrarse a una plataforma IoT para obtener datos de variables del aire que afectaban la contaminación ambiental en la ciudad de San Juan de Pasto. Se utilizaron plataformas IoT que facilitaban el acceso a la información en tiempos instantáneos mediante la integración de hardware y software de bajo costo, como sensores y tarjeta controladora que incrementaban la funcionalidad del prototipo.

La instalación del sensor cumple requisitos regulatorios que garantizan mediciones confiables y pueden utilizarse estas tecnologías para comprar otros dispositivos y respaldar la toma de datos.

La planificación de requerimientos y la búsqueda sistemática avanzada en la base de datos permite crear el diseño del sistema propuesto de monitoreo de material particulado para monitorear las zonas de la ciudad y la visualización de datos mediante un mapa que permite indicar el nivel de concentración de contaminantes atmosféricos al usuario final.

La estructura del sistema desarrollado se caracteriza por su portabilidad y flexibilidad durante la instalación. Se ha logrado esta versatilidad mediante el uso de materiales livianos y un diseño compacto del sensor de polvo. Estas características no solo hacen que el sistema sea fácil de transportar e instalar en diferentes ubicaciones, sino que también contribuyen a su eficiencia operativa al minimizar el espacio necesario para su funcionamiento.

En cuanto a la resolución del sistema, se prestó especial atención a la validación interna y la calibración de fábrica del sensor. Estas medidas fueron fundamentales para asegurar mediciones precisas y confiables de las variables ambientales. La validación interna implicó la verificación de la precisión y exactitud del sensor en condiciones controladas, mientras que la calibración de fábrica aseguró que el sensor estuviera ajustado correctamente para proporcionar resultados precisos en el campo.

La visualización y difusión de datos son aspectos clave del sistema desarrollado, ya que no solo se limita a la recopilación de información, sino que también se enfoca en presentar los datos de manera efectiva en un mapa de la ciudad. Esta función permite que los datos sean comprensibles para el usuario final, lo cual es esencial para facilitar la comprensión sobre la calidad del aire y su clasificación.

La capacidad de visualizar los datos a través de una página web proporciona una clara evidencia de concentraciones de contaminantes en diferentes áreas de la ciudad, a través de la representación de patrones y tendencias del comportamiento y la distribución de la contaminación atmosférica. Esta información puede respaldar investigaciones por los expertos en salud pública y calidad del aire, ya que el prototipo permite la aplicabilidad en otros contextos y puede ser adaptado en otras ciudades y regiones.

Asimismo, el prototipo puede ser utilizado por estudiantes de los laboratorios de la Universidad Mariana.

4. Recomendaciones

Se recomienda para trabajos futuros la integración de sensores adicionales para proporcionar una imagen completa de la calidad del aire en la ciudad.

Es posible integrar un algoritmo de predicción que anticipe cambios en la calidad del aire e informe al público sobre las condiciones esperadas en las próximas horas o emita alertas tempranas sobre picos de contaminación a través del consumo de alguna API de las redes sociales, correo electrónico o el uso de bots. El prototipo permite esta escalabilidad gracias a la integración con Raspberry Pi 4.

A futuro se recomienda realizar investigaciones para identificar fuentes de contaminación y mitigación integrando un GPS para determinar la ubicación del monitoreo. Así mismo continuar con la optimización de la plataforma IoT y la base de datos MySQL para garantizar la eficiencia de la recopilación de datos y la seguridad mediante la integración y autenticación de usuario y contraseña (login).

Referencias bibliográficas

- Área Metropolitana Valle de Aburrá. (2019). Estudio Eventos en salud asociados a la contaminación del aire. *Estudio Sobre La Contaminación del Aire*, 1. <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/estudio-eventos-en-salud-asociados-a-la-contaminacion-del-aire.aspx#>
- Barrio, M. (2018). *Internet de las Cosas*.
- Benavides, I. F. (2019, 30 de septiembre). *Calidad del aire en Pasto no es la mejor de Colombia*. <https://periodico.udenar.edu.co/calidad-del-aire-en-pasto-no-es-la-mejor-de-colombia/>
- Codex Meteorologic. (s.f.). Sensor Temperatura/Humedad THGN800 - http://wiki.meteorologic.net/wiki/Sensor_Temperatura/Humedad_THGN800
- Corporación Autónoma Regional de Nariño [CORPONARIÑO]. (2017). *Corporación Autónoma Regional de Nariño*. 19.
- Dhingra, S., Madda, R. B., Gandomi, A. H., Patan, R., & Daneshmand, M. (2019). Internet of things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5577–5584. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903821>
- DustTrak II 8530*. (s. f.). Retrieved November 7, 2021, from <http://www.inteconinc.com/latam/index.php/productos/material-particulado-en-tiempo-real/45-dusttrak-ii-8530>
- Epistemus, C. T. S. (s.f.). *Monitoreo de calidad del aire Low cost sensors for air quality measurement*. 31–37.
- Fallis, A. G. (2013). Mastering Concurrency in Python. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9)

Farmasesores. (s.f.). ¿Estas utilizando el Termohigrómetro de forma adecuada?
<https://farmasesores.com/sin-categoria/entrada-1/>

Feenstra, B., Papapostolou, V., Hasheminassab, S., Zhang, H., Boghossian, B. der, Cocker, D., & Polidori, A. (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM2.5 sensors at an ambient air monitoring site. *Atmospheric Environment*, 216, 5.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116946>

Gómez, V. T., Viviana, A. y Laverde, M. (2006). Índice de Calidad del aire para el Valle de Aburrá. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 1–6.

Hawari, H. F., Zainal, A. A., & Ahmad, M. R. (2019). Development of real time internet of things (IoT) based air quality monitoring system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(3), 1039–1047.
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i3.pp1039-1047>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2019). *Del Aire En Colombia*. 18.

Instruments, P. C. E., Ib, P. C. E., Calle, B., Dumont, S., & Comuna, T. (n.d.). *No Title*.
https://www.pce-instruments.com/colombia/api/getartfile?_fnr=1291593&_dsp=inline

IoT Internet of Things. (s. f.). *IoT: El Internet de las cosas en las empresas Cordobesas*.
<https://sites.google.com/ieslafuentsanta.es/iot/proceso/estudio-plataformas-iot/software/thingspeak>

Karar, M. E., Al-Masaad, A. M., & Reyad, O. (2020). Gasduino-wireless air quality monitoring system using internet of things. *Information Sciences Letters*, 9(2), 113–117.
<https://doi.org/10.18576/isl/090208>

Malche, T., Maheshwary, P., & Kumar, R. (2019). Environmental Monitoring System for Smart

City Based on Secure Internet of Things (IoT) Architecture. *Wireless Personal Communications*, 107(4), 2143–2172. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06376-0>

Marques, G., Ferreira, C. R., & Pitarma, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment Using a CO₂ Monitoring System Based on Internet of Things. *Journal of Medical Systems*, 43(3). <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1184-x>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire*. 287.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Diagnostico nacional de salud ambiental*.

<https://www.Minsalud.Gov.Co/Sites/Rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.Pdf>, 368.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *La capital de Nariño, entre las ciudades con mejor calidad del aire en Colombia* <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/3657-la-capital-de-narino-entre-las-ciudades-con-mejor-calidad-del-aire-en-colombia>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Contaminación Atmosférica* <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible de Colombia [Minambiente]. (2006). (601) 04 (Issue 601).

Mohd Pu'ad, M. F., Gunawan, T. S., Kartiwi, M., & Janin, Z. (2019). Performance evaluation of portable air quality measurement system using raspberry Pi for remote monitoring. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), 564–574. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp564-574>

Nursalam. (2016). *Metode penelitian*,

Onursal, B. y Gautam, S. P. (1997). *Contaminación por vehículos automotores Experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina Bekir Onursal*.

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2018, 2 de mayo). *Nueve de cada 10 personas en todo el mundo respiran aire contaminado, pero más países están tomando acciones*. <https://www.paho.org/es/noticias/2-5-2018-nueve-cada-10-personas-todo-mundo-respiran-aire-contaminado-pero-mas-paises-estan>

Quiñones Cuenca, M., González Jaramillo, V., Jumbo, M. y Torres, R. (2017). Sistema de Monitoreo de Variables Medioambientales Usando Una Red de Sensores Inalámbricos y Plataformas De Internet De Las Cosas (Monitoring System of Environmental Variables Using a Wireless Sensor Network and Platforms of Internet of Things). *Enfoque UTE*, 8(1), 329–343. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>

Rodrigo, J. Á. (2009). *Emisiones contaminantes Catalizadores para motores DIESEL*.

Sanchez, E. Y. (2020). Calidad del aire. *Calidad del Aire*. <https://doi.org/10.35537/10915/73756>

Sans, R. (1989). *Ingeniería Ambiental.pdf* (Marcombo).

Sensirion. (s.f.). *SPS30 - PM2.5 Sensor for HVAC and air quality applications SPS30*. <https://sensirion.com/products/catalog/SPS30/>

Sentry, T. D., & Sentry, D. (s. f.). *Near reference real-time particle monitor for specific dust fractions*.

Suriano, D. (2021). A portable air quality monitoring unit and a modular, flexible tool for on-field evaluation and calibration of low-cost gas sensors. *HardwareX*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00198>

- Taştan, M., & Gökozan, H. (2019). Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/app9163435>
- Thermo Fisher. (s. f.). *Muestreador de aire Partisol™ 2000i*. Retrieved May 19, 2020, from <https://lc.cx/TS4IJV>
- Thingspeak. (2016). *IoT Analytics - ThingSpeak Internet of Things*. <https://thingspeak.com/>
- TSI. (2013). *Monitor De Aerosoles Dusttrak™ Drx Modelos 8533, 8533EP Y 8534*. 8534, 1–4.
- Tyler, N., Acevedo, J., Bocarejo, J. P. y Velásquez, J. M. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. Universidad de Los Andes. <https://lc.cx/V2vnGN>
- UNIT Electronics (s.f.). *PMS5003 Sensor de calidad de aire PM2.5 - UNIT Electronics*. <https://uelectronics.com/producto/pms5003-sensor-de-calidad-de-aire-pm2-5/>
- Viaindustrial. (s. f.). *Bombas de muestreo de aire para material particulado Gilian 5000 gilian 570225 Colombia*. <https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=570225>
- Xataka. (2019). *Raspberry Pi 4, características, precio y ficha técnica*. <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-4-caracteristicas-precio-ficha-tecnica>
- Zakaria, N. A., Abidin, Z. Z., Harum, N., Hau, L. C., Ali, N. S., & Jafar, F. A. (2018). Wireless internet of things-based air quality device for smart pollution monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(11), 65–69. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.091110>
- Zheng, K., Zhao, S., Yang, Z., Xiong, X., & Xiang, W. (2016). Design and Implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System. *IEEE Access*, 4, 3238–3245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2582153>

Anexos

Anexo A. Cotización equipo comercial



SANAMBIENTE S.A.S
 NIT: 805000004-1
 REGIMEN COMÚN
 Cali - Colombia

COTIZACIÓN

No. COT7279

FT-CPS-05
 Versión 6

Fecha: 16-04-2020

Página 1 de 2

Datos del Cliente / CTA59

Cliente: UNIVERSIDAD MARIANA
Nit: 800092198
Teléfono: 7314923
Dirección: CL18 34 104
Ciudad: PASTO

Datos del Contacto

Nombre: EDUARDO
Apellido: CHANA
Cargo: ing Mecatronica
Celular: 3215987496
Email: eduardochana97@gmail.com

Datos del Vendedor

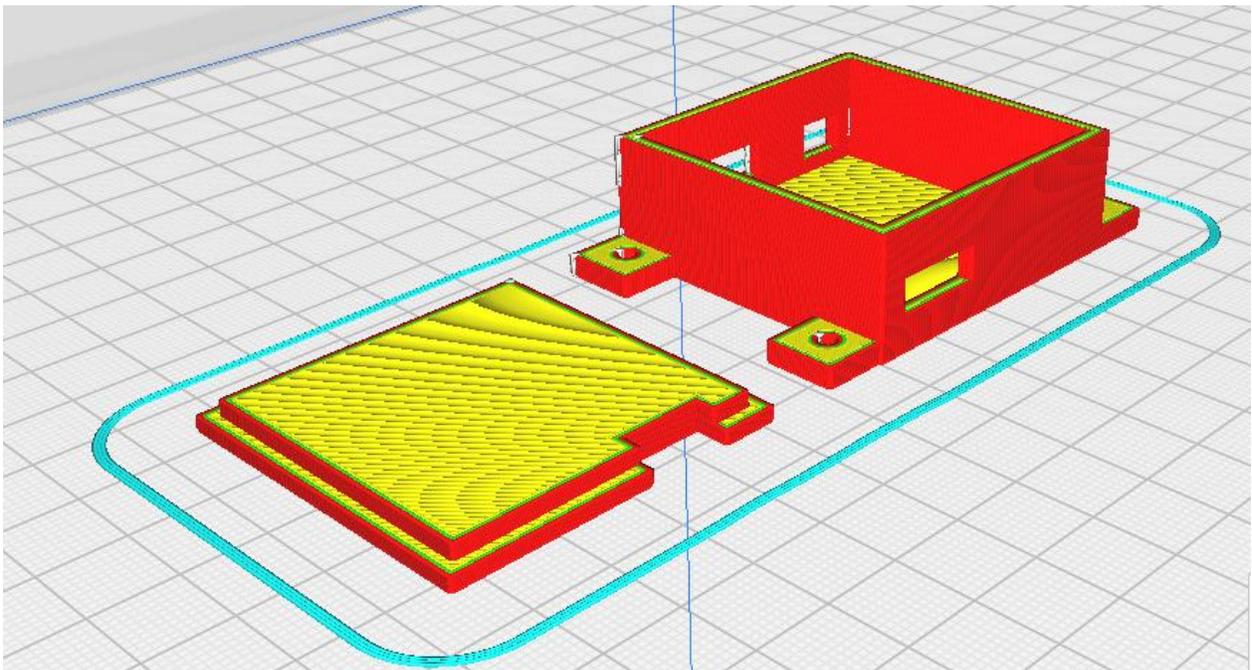
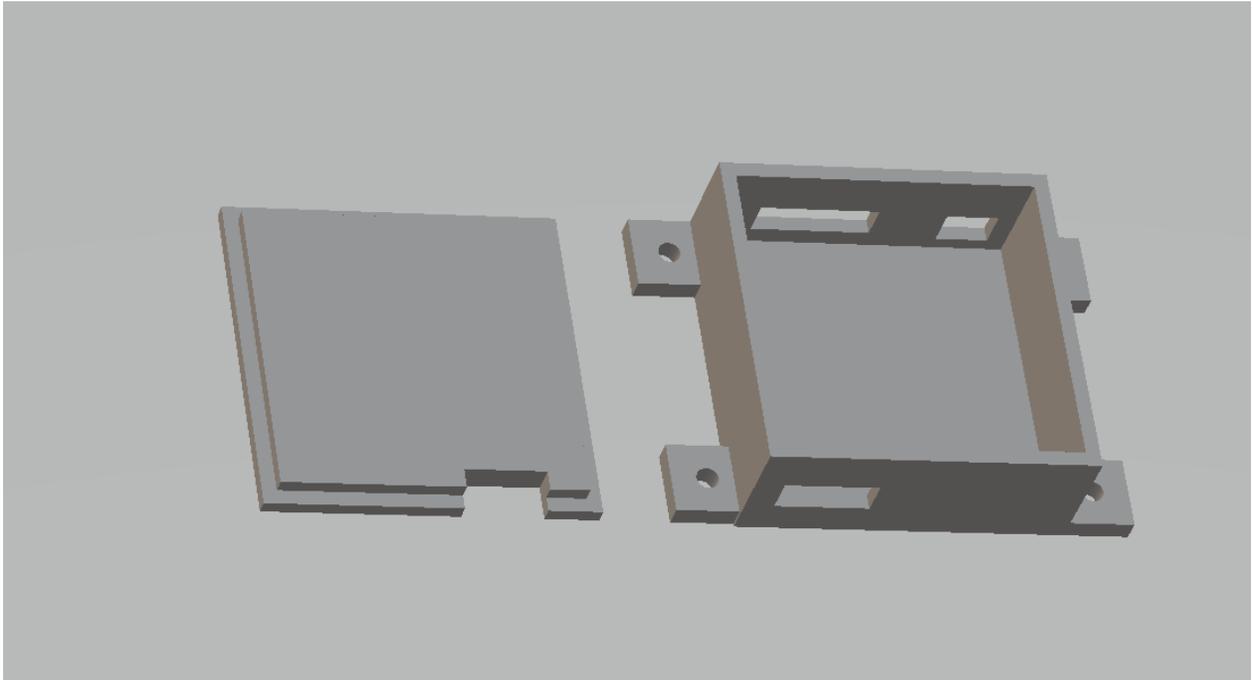
Nombre: Carlos Eduardo
Apellido: Fernandez
Cargo: Lider Gestion Comercial
Celular: 3148881476
Email: c.fernandez@sanambiente.com.co
Zona: T-3

Atendiendo la solicitud, dejamos en consideración la siguiente cotización:

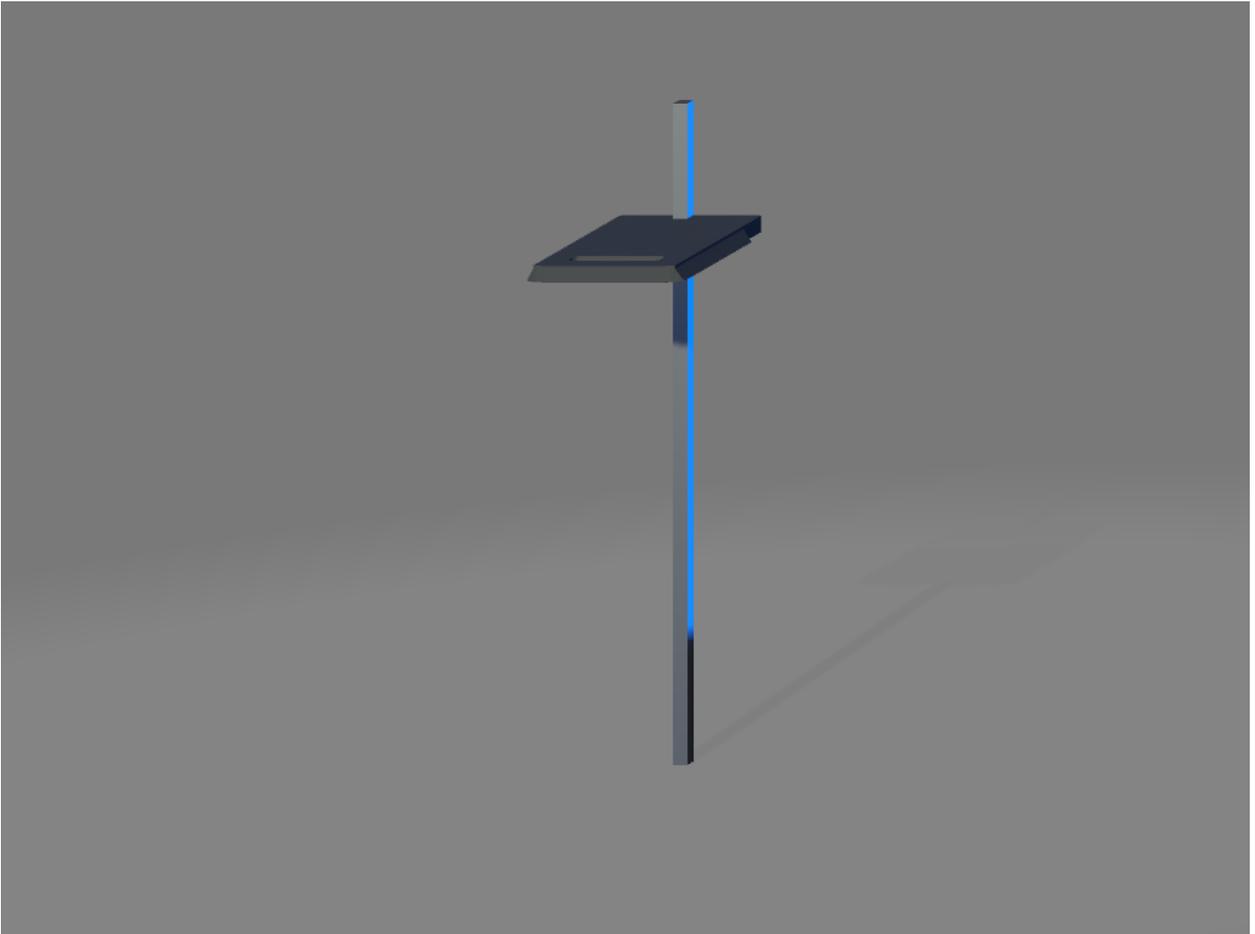
ITEM	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANT	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
1	Dust Sentry Base Unit	MONITOR DE PARTICULAS PARA AMBIENTE - DUST SENTRY Marca: AeroqualRef. Dust Sentry Base UnitMonitor portatil para medición continua en tiempo real de particulas en el aire ambiente; cuenta con aprobación para PM10 SIRA MC130235/00 y adicionalmnete puede ser utilizado para medición de TSP, PM2.5, PM1. Tarjeta SD incorporada para el registro de datos, accede a los datos a traves de un modem, PLC, SCADA.Facil instalacion de sensores meteorologicos.Rapido de instalar y reubicar.Carcasa IP65 Filtro gravimetrico (opcional) Este equipo incluye los ítem 2,3 y 4	1,00	12.764,00	12.764,00
2	DS SC10	Ciclon PM10 Marca: AeroqualRef. DS SC10	1,00	0,00	0,00
3	DS R47	Conjunto de filtro de 47 mm para análisis de carga de particulas Conjunto de filtro de 47 mm para análisis de carga de particulas (incluye 2 membranas de filtro)Ref. DS R47Marca. Aeroqual	1,00	0,00	0,00
4	DS R38	CELLULAR IP MODEM DS R38 CELLULAR IP MODEM	1,00	0,00	0,00

TOTAL	\$	12.764,00
DESCUENTO	\$	0,00
SUBTOTAL	\$	12.764,00
IVA	\$	2.425,16
TOTAL	\$	15.189,16

Anexo B. Diseño caja de alojamiento del sensor SPS30



Anexo C. Diseño de Soporte de Estructura de Condiciones Ideales para el sensor SPS30



Anexo D. Programación del SPS30 en Python

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # coding=utf-8
3  #
4  # Copyright © 2018 UnravelTEC
5  # Michael Maier <michael.maier+github@unraveltec.com>
6  #
7  # This program is free software: you can redistribute it and/or modify
8  # it under the terms of the GNU General Public License as published by
9  # the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
10 # (at your option) any later version.
11 #
12 # This program is distributed in the hope that it will be useful,
13 # but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
14 # MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
15 # GNU General Public License for more details.
16 #
17 # You should have received a copy of the GNU General Public License
18 # along with this program. If not, see <https://www.gnu.org/licenses/>.
19 #
20 # If you want to relicense this code under another license, please contact
info+github@unraveltec.com.
21
22 # This module uses the services of the C pigpio library. pigpio must be running on the Pi(s) whose
GPIO are to be manipulated.
23 # cmd ref: http://abyz.me.uk/rpi/pigpio/python.html#i2c_write_byte_data
24 # aptitude install python3-pigpio
25 import pigpio # controlar entradas y salidas
26 import time # controlar el tiempo
27 import struct # interpretar bytes como paquetes de datos binarios
28 import sys # controlar parametros y funciones especificas del sistema
29 # aptitude install python3-crcmod
30 import crcmod
31 import os, signal
32 from subprocess import call
33 #integracion de libreria a la nube
34 import requests
35 import time
36
37 import pprint
38 #####
39 import mysql.connector
40
41 conexion=mysql.connector.connect(host="localhost", user="eduardo", passwd="123456",
database="aire")
42 cursor1=conexion.cursor()
43
44 #####
45
46 def eprint(*args, **kwargs):
47     print(*args, file=sys.stderr, **kwargs)
48
49 #LOGFILE = '/run/sensors/sps30/last'
50 LOGFILE = '/home/eduardo/Documentos/run/last.txt'
51
52 PIGPIO_HOST = '127.0.0.1'
53 I2C_SLAVE = 0x69
54 I2C_BUS = 1
55
56 DEBUG = False
57
58 deviceOnI2C = call("i2cdetect -y 1 0x69 0x69|grep '\-\-' -q", shell=True) # grep exits 0 if match
found
59 if deviceOnI2C:
60     print("I2Cdetect found SPS30")

```

```

61 else:
62     print("SPS30 (0x69) not found on I2C bus")
63     exit(1)
64
65 def exit_gracefully(a,b):
66     print("exit")
67     stopMeasurement()
68     os.path.isfile(LOGFILE) and os.access(LOGFILE, os.W_OK) and os.remove(LOGFILE)
69     pi.i2c_close(h)
70     exit(0)
71
72 signal.signal(signal.SIGINT, exit_gracefully)
73 signal.signal(signal.SIGTERM, exit_gracefully)
74
75
76
77 pi = pigpio.pi(PIGPIO_HOST)
78 if not pi.connected:
79     eprint("no connection to pigpio daemon at " + PIGPIO_HOST + ".")
80     exit(1)
81 else:
82     if DEBUG:
83         print("connection to pigpio daemon successful")
84
85
86 try:
87     pi.i2c_close(0)
88 except:
89     tupl = sys.exc_info()
90     if tupl[1] and str(tupl[1]) != "'unknown handle'":
91         eprint("Unknown error: ", tupl)
92
93 #try:
94 h = pi.i2c_open(I2C_BUS, I2C_SLAVE)
95 #except:
96 # eprint("i2c open failed")
97 # exit(1)
98
99 #def i2cOpen():
100 # global h
101 # try:
102 #     h = pi.i2c_open(I2C_BUS, I2C_SLAVE)
103 # except:
104 #     eprint("i2c open failed")
105 #     exit(1)
106
107
108 f_crc8 = crcmod.mkCrcFun(0x131, 0xFF, False, 0x00)
109
110 def calcCRC(TwoBdataArray):
111     byteData = ''.join(chr(x) for x in TwoBdataArray)
112     return f_crc8(byteData.encode())
113
114 # print(hex(calcCRC([0xBE,0xEF])))
115
116 def readNBytes(n):
117     try:
118         (count, data) = pi.i2c_read_device(h, n)
119     except:
120         eprint("error: i2c_read failed")
121         exit(1)
122
123     if count == n:
124         return data
125     else:

```

```

126     eprint("error: read bytes didnt return " + str(n) + "B")
127     return False
128
129 # takes an array of bytes (integer-array)
130 def i2cWrite(data):
131     try:
132         pi.i2c_write_device(h, data)
133     except Exception as e:
134         pprint.pprint(e)
135         eprint("error in i2c_write:", e.__doc__ + ":", e.value)
136         return -1
137     return True
138
139 def readFromAddr(LowB,HighB,nBytes):
140     for amount_tries in range(3):
141         ret = i2cWrite([LowB, HighB])
142         if ret != True:
143             eprint("readFromAddr: write try unsuccessful, next")
144             continue
145         data = readNBytes(nBytes)
146         if data:
147             return data
148         eprint("error in readFromAddr: " + hex(LowB) + hex(HighB) + " " + str(nBytes) + "B did return
Nothing")
149     eprint("readFromAddr: write tries(3) exceeded")
150     return False
151
152 def readArticleCode():
153     data = readFromAddr(0xD0,0x25,47)
154     if data == False:
155         eprint('readArticleCode failed')
156         return False
157
158     acode = ''
159     crcs = ''
160     for i in range(47):
161         currentByte = data[i]
162         if currentByte == 0:
163             break;
164         if (i % 3) != 2:
165             acode += chr(currentByte) + '|'
166         else:
167             crcs += str(currentByte) + '.'
168     print('Article code: "' + acode + "'")
169     return True
170
171 def readSerialNr():
172     data = readFromAddr(0xD0,0x33,47)
173     if data == False:
174         eprint('readSerialNr failed')
175         return False
176
177     snr = ''
178     for i in range(47):
179         if (i % 3) != 2:
180             currentByte = data[i]
181             if currentByte == 0:
182                 break;
183             if i != 0:
184                 snr += '-'
185             snr += chr(currentByte)
186     print('Serial number: ' + snr)
187     return True
188
189 def readCleaningInterval():

```

```

190 data = readFromAddr(0x80,0x04,6)
191 if data and len(data):
192     interval = calcInteger(data)
193     print('cleaning interval:', str(interval), 's')
194
195 def startMeasurement():
196     ret = -1
197     for i in range(3):
198         ret = i2cWrite([0x00, 0x10, 0x03, 0x00, calcCRC([0x03,0x00])])
199         if ret == True:
200             return True
201         eprint('startMeasurement unsuccessful, next try')
202         bigReset()
203     eprint('startMeasurement unsuccessful, giving up')
204     return False
205
206 def stopMeasurement():
207     i2cWrite([0x01, 0x04])
208
209 def reset():
210     if DEBUG:
211         print("reset called")
212     for i in range(5):
213         ret = i2cWrite([0xd3, 0x04])
214         if DEBUG:
215             print("reset sent")
216         if ret == True:
217             if DEBUG:
218                 print("reset ok")
219             return True
220         eprint('reset unsuccessful, next try in', str(0.2 * i) + 's')
221         time.sleep(0.2 * i)
222     eprint('reset unsuccessful')
223     return False
224
225
226
227 def readDataReady():
228     data = readFromAddr(0x02, 0x02,3)
229     if data == False:
230         eprint("readDataReady: command unsuccessful")
231         return -1
232     if data and data[1]:
233         if DEBUG:
234             print("✓")
235         return 1
236     else:
237         if DEBUG:
238             print('.',end='')
239         return 0
240
241 def calcInteger(sixBArray):
242     integer = sixBArray[4] + (sixBArray[3] << 8) + (sixBArray[1] << 16) + (sixBArray[0] << 24)
243     return integer
244
245 def calcFloat(sixBArray):
246     struct_float = struct.pack('>BBBB', sixBArray[0], sixBArray[1], sixBArray[3], sixBArray[4])
247     float_values = struct.unpack('>f', struct_float)
248     first = float_values[0]
249     return first
250
251 def printPrometheus(data):
252     pm10 = calcFloat(data[18:24])
253     if pm10 == 0:
254         eprint("pm10 == 0; ignoring values")

```

```

255     return
256
257     output_string = 'particulate_matter_ppcm3{{size="pm0.5",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[24:30]))
258     output_string += 'particulate_matter_ppcm3{{size="pm1",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[30:36]))
259     output_string += 'particulate_matter_ppcm3{{size="pm2.5",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[36:42]))
260     output_string += 'particulate_matter_ppcm3{{size="pm4",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[42:48]))
261     output_string += 'particulate_matter_ppcm3{{size="pm10",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[48:54]))
262     output_string += 'particulate_matter_ugpm3{{size="pm1",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data))
263     output_string += 'particulate_matter_ugpm3{{size="pm2.5",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[6:12]))
264     output_string += 'particulate_matter_ugpm3{{size="pm4",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[12:18]))
265     output_string += 'particulate_matter_ugpm3{{size="pm10",sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format( pm10
)
266     output_string += 'particulate_matter_typpartsiz_um{{sensor="SPS30"}} {0:.8f}\n'.format(
calcFloat(data[54:60]))
267     # print(output_string)
268     logfilehandle = open(LOGFILE, "w",1)
269     logfilehandle.write(output_string)
270     logfilehandle.close()
271
272     def printHuman(data):
273         #print("pm0.5 count: %f" % calcFloat(data[24:30]))
274         #print("pm1   count: {0:.3f} ug: {1:.3f}".format( calcFloat(data[30:36]), calcFloat(data) ) )
275         #print("pm2.5 count: {0:.3f} ug: {1:.3f}".format( calcFloat(data[36:42]), calcFloat(data[6:12]) )
)
276         #print("pm4   count: {0:.3f} ug: {1:.3f}".format( calcFloat(data[42:48]), calcFloat(data[12:18])
) )
277         #print("pm10  count: {0:.3f} ug: {1:.3f}".format( calcFloat(data[48:54]), calcFloat(data[18:24])
) )
278         data_envio = calcFloat(data[18:24])
279         return data_envio
280         #print("pm_tpy: %f" % calcFloat(data[54:60]))
281
282
283     def readPMValues():
284         print("Lectura de datos")
285         data = readFromAddr(0x03,0x00,59)
286         printPrometheus(data)
287         printHuman(data)
288         return data
289
290     def send_data(data):
291         print("enviando datos")
292         #pm10 = printHuman(data)
293         url_pm10 = "https://api.thingspeak.com/update?api_key=DRBYUZANZYRQJMAW&field1=" #url obtenida
desde Thingspeak
294         #concatenar URL más valor
295         url_envio = url_pm10 + str(round(calcFloat(data[18:24]),2))
296         url_pm25 = "https://api.thingspeak.com/update?api_key=DRBYUZANZYRQJMAW&field2="
297         #print(url_envio)
298         url_envio2 = url_pm25 + str(round(calcFloat(data[6:12]),2))
299         #enviar dato
300         r = requests.get(url_envio,url_envio2)
301         print(r)
302
303     def initialize():
304         startMeasurement() or exit(1)
305         time.sleep(0.9)

```

```

306
307 def bigReset():
308     global h
309     if DEBUG:
310         print("bigReset.")
311         eprint('resetting...',end='')
312         pi.i2c_close(h)
313         time.sleep(0.5)
314         h = pi.i2c_open(I2C_BUS, I2C_SLAVE)
315         time.sleep(0.5)
316         reset()
317         time.sleep(0.1) # note: needed after reset
318
319 if len(sys.argv) > 1 and sys.argv[1] == "stop":
320     exit_gracefully(False,False)
321
322 #call(["mkdir", "-p", "/run/sensors/sps30"])
323 call(["mkdir", "-p", "/home/eduardo/Documentos/run"])
324
325 readArticleCode() or exit(1)
326
327 reset()
328 time.sleep(0.1) # note: needed after reset
329
330 readSerialNr()
331 readCleaningInterval()
332
333 initialize()
334
335 while True:
336     ret = readDataReady()
337     if ret == -1:
338         eprint('resetting...',end='')
339         bigReset()
340         initialize()
341         continue
342
343     if ret == 0:
344         time.sleep(0.1)
345         continue
346
347     data = readPMValues()
348     send_data(data)
349     print("PM10 :")
350     data = calcFloat(data[18:24])
351     pm10=data
352     print(data)
353     data = readPMValues()
354     print("PM2.5 :")
355     data = calcFloat(data[6:12])
356     pm25=data
357     print(data)
358     time.sleep(20)
359     #####
360     sql="insert into variables (PM10,PM25) values ('"+ str(pm10)+"', '"+ str(pm25)+"'"
361     print(sql)
362     cursor1.execute(sql)
363     conexion1.commit()
364     #conexion1.close()

```

Anexo E. Link de Repositorio de GitHub público

<https://github.com/Eduardo-oss/TDG-SPS30-Unimar2024>

Anexo F. Evidencia fotográfica del método gravimétrico

Método Gravimétrico



Medición de Caudal:
2.4 L/min

Equipo DustTrak



Preparación de
muestreadores MP10
y MP2,5

Balanza laboratorio
de química



Filtros de
concentración de
MP: 20 muestras

Inicio de prueba
método
gravimétrico



Correlación de (2)
dispositivos de forma
temporizada

Anexo G. Evidencia fotográfica de los sitios de monitoreo

