



Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas durante el periodo 2023 – 2025.

TESIS DOCTORAL

que, para obtener el Grado de Ph.D.

DOCTOR EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

PRESENTA

Angel Alejandro Rodriguez Aya

ASESOR

Lyzzi Coromoto Davalillo Bolívar

México, (2025)

La presente Tesis Doctoral debe ser citada como:

Rodriguez Aya, Angel Alejandro (2025). Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas durante el periodo 2023 – 2025. [Tesis de Doctorado de la Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX]



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Se permite la reproducción total o parcial y la comunicación pública de la obra con reconocimiento de la autoría y mención de la Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX.

No se permite el uso comercial ni la creación de obras derivadas.

Resumen.

La presente investigación doctoral tuvo como propósito diseñar una metodología integral para el uso eficiente de las estaciones de monitoreo de variables ambientales de bajo costo que integran tecnologías IoT, con el fin de mejorar su sostenibilidad, precisión de los datos y la gestión operativa en instituciones colombianas. El estudio se caracterizó por la aplicación del enfoque mixto, bajo una estrategia propositiva-aplicada, mediante métodos teóricos y empíricos. En este marco, se analizaron datos históricos de calidad del aire disponibles de fuentes oficiales colombianas como las de fuentes oficiales como IDEAM–SISAIRE y RMCAB, tanto como de las estaciones IoT de bajo costo de World Air Quality Index (aqicn.org), además de 384 encuestas y entrevistas a expertos. En cuanto a los hallazgos, los resultados evidenciaron diferencias entre las mediciones oficiales y las IoT, y una baja apropiación de la comunidad educativa, con limitaciones técnicas, formativas y de articulación institucional. A partir de estos hallazgos, se formuló una metodología en seis fases, desde el diagnóstico hasta la evaluación continua, validada por expertos mediante el método Delphi. Los resultados de la validación reflejaron altos niveles de concordancia y pertinencia, lo que confirma la factibilidad y aplicabilidad de la propuesta. Finalmente, la metodología representa un aporte innovador al integrar tecnologías IoT con procesos educativos y de gestión ambiental, fortaleciendo la conciencia ambiental en instituciones con recursos limitados y ofreciendo un modelo replicable en contextos nacionales e internacionales.

Palabras clave: IoT, calidad del aire, monitoreo ambiental, sostenibilidad, educación ambiental, metodología, propuesta aplicada.

Abstract.

This doctoral research aimed to design a comprehensive methodology for the efficient use of low-cost environmental monitoring stations that integrate IoT technologies, with the purpose of enhancing their sustainability, data accuracy, and operational management in Colombian institutions. The study was characterized by a mixed-methods approach under a propositional-applied strategy, employing both theoretical and empirical methods. Within this framework, historical air quality data were analyzed from official Colombian sources such as IDEAM–SISAIRE and RMCAB, as well as from low-cost IoT stations provided by the World Air Quality Index (aqicn.org), in addition to 384 surveys and expert interviews. The findings revealed significant differences between official measurements and IoT-based stations, along with a limited appropriation by the educational community, constrained by technical, training, and institutional articulation gaps. Based on these findings, a six-phase methodology was developed, ranging from diagnosis to continuous evaluation, and validated by experts through the Delphi method. The validation results showed elevated levels of agreement and pertinence, confirming both the feasibility and applicability of the proposal. The methodology constitutes an innovative contribution by integrating IoT technologies with educational and environmental management processes, strengthening environmental awareness in resource-limited academic contexts, and offering a replicable model for both national and international settings.

Keywords: IoT, air quality, environmental monitoring, sustainability, environmental education, methodology, applied proposal

Agradecimientos.

Expreso mi agradecimiento primero a Dios, por brindarme la oportunidad de llegar a este nivel de formación, quien ha sido mi guía a lo largo de mi vida tanto en mi trayectoria académica como profesional.

Agradezco sinceramente a la Dra. Lyzzi Coromoto Davalillo Bolívar, quien demostró su amor y dedicación en la orientación durante el desarrollo de esta investigación.

Mi agradecimiento se extiende también a cada una de las personas que participaron en cada uno de los instrumentos de la propuesta y a los especialistas, cuya contribución fue fundamental para el desarrollo y culminación de este trabajo.

Dedicatorias.

Dedico este trabajo a mi padre Ángel de Jesús que a pesar de que ya no está presente en este mundo terrenal, fue la persona que me apoyó para llegar a donde estoy en estos momentos, y a mi madre Ana Lucia, quien estuvo allí en compañía de mi padre y fue partícipe de la motivación y unión familiar.

También lo dedico a mi hija Maite Alejandra, quien fue mi motivación para culminar este trabajo con éxito.

A mi esposa Ingrid Stefanny, quien ha sido mi compañía y soporte en mi vida, además de brindarme motivación en cada uno de los retos que hemos decidido afrontar.

Finalmente, a mi amigo Juan Alejandro, que me motivó a iniciar este proceso y que me ha aportado grandes consejos en mi vida.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	15
Capítulo I. Proyección de la Investigación.	17
1.1. Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación de México y su ámbito de estudio.....	17
1.1.1. Importancia del tema en el contexto.	18
1.2. Planteamiento del problema.....	19
1.3. Formulación del problema (Pregunta de investigación).	23
1.4. Justificación.....	23
1.5. Objeto de Estudio.....	25
1.6. Campo de Acción.....	25
1.7. Objetivos	26
1.7.1. Objetivo General	26
1.7.2. Objetivos Específicos.....	26
1.8. Hipótesis.....	27
1.9. Alcance temático.....	27
1.10. Delimitaciones (temporal y espacial).....	28
Capítulo II. Fundamentos Teóricos.....	30
2.1. Estado del Arte (marco histórico y actual).....	30
2.1.1. Marco Histórico.	30
2.1.2. Marco Actual.....	33
2.2. Marco Teórico.....	44
2.2.1. Definición de la calidad del aire.....	44
2.2.3. Definición del IoT.....	47

2.2.4. Impacto del monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas	50
2.2.5. Uso de datos satelitales para validar estaciones terrestres.	54
2.3. Marco Conceptual.....	57
2.3.1. Calidad del aire	57
2.3.2. Tecnología IoT (Internet de las Cosas).....	61
2.3.3. Estaciones de monitoreo ambiental.....	61
2.3.4. Metodología integral.....	64
2.4. Marco Contextual.....	64
2.5. Marco Legal y Normativo.....	65
2.5.1. Normatividad y Acuerdos Internacionales.....	65
2.5.2. Normatividad Colombiana.....	67
3. Capítulo III. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación	69
3.1. Cuadro Operacionalización de variables.....	69
3.2. Diseño metodológico.....	74
3.2.1. Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis.	74
3.2.2. Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos.	78
3.2.3. Determinación de la muestra y su criterio de selección.....	83
3.3. Trabajo de campo.....	88
3.3.1. Organización y planificación	88
3.3.2. Procedimiento ejecutado	88
3.3.3. Cronograma de acciones	89
3.3.4. Evidencias del trabajo de campo.....	90
3.4. Aplicación de los instrumentos.....	90
3.4.1. Aplicación de las encuestas.....	90

3.4.2.	Aplicación de las entrevistas.....	91
3.4.3.	Recolección de Datos de Estaciones de Monitoreo	92
3.4.4.	Prueba Piloto y Validación de Instrumentos.....	93
3.5.	Procesamiento de la información.....	93
3.5.1.	Procesamiento de los Instrumentos Aplicados.....	93
3.5.2.	Evaluación de la Efectividad del Procesamiento de Datos.	96
3.6.	Análisis de los resultados en los datos obtenidos.....	97
3.6.1.	Análisis de las encuestas.....	97
3.6.2.	Análisis de entrevistas con expertos	105
3.6.3.	Análisis de datos de estaciones de monitoreo	115
3.7.	Redacción de resultados y discusión.....	126
3.7.1.	Tendencias generales identificadas	127
3.7.2.	Contraste con el marco teórico y estudios previos.....	128
3.7.3.	Implicaciones territoriales y proyectivas	128
4.	Capítulo IV: Propuesta de Transformación.....	130
4.1.	Fundamentación de la propuesta de transformación.....	130
4.2.	Estructura de la propuesta de transformación.....	132
4.3.	Valoración/ evaluación / validación de la propuesta de transformación.	
	149	
	CONCLUSIONES	156
	RECOMENDACIONES	159
	Referencias.....	160
	Anexos	168
	Anexo A. Instrumentos de recolección de información.....	168
	Anexo B. Recopilación de los datos de las fuentes oficiales y las salidas de campo.....	190

Anexo C. Valoración de la propuesta.	194
---	-----

Índice de Figuras.

Figura 1. Estratificación Socioeconómica Propuesta para la Zona Urbana de Bogotá - Escenario 4.....	33
Figura 2. Localización de muestras difusas	34
Figura 3. Diagrama de componentes.....	35
Figura 4. Diseño de sensor de calidad del aire.....	36
Figura 5. Relación de la pendiente y la intersección de la línea de regresión lineal del promedio horario de PM2.5	37
Figura 6. Relación de enfermos con asma	38
Figura 7. Sitio Web de monitoreo de calidad del aire AQI.....	39
Figura 8. Ejemplo de las configuraciones de ventilación natural para medir la concentración de CO2	40
Figura 9. Diseño de una estación IoT de monitoreo de Calidad del Aire	41
Figura 10. Equipo Smart-Air	42
Figura 11. Arquitectura IoT	48
Figura 12. La arquitectura general del sistema de monitoreo de atención médica	49
Figura 13. Aplicación del internet de las cosas con aplicaciones prácticas.	50
Figura 14. Equipos de medición.....	52
Figura 15. Aulas de Clase	52
Figura 16. Mapa de interpolación de PM _{2,5} y AOD para el 3 de marzo de 2020.....	55
Figura 17. Esquema del marco de estudio IMSEM	56
Figura 18 Directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud –OMS sobre la calidad del aire para periodos de exposición cortos.....	60
Figura 19. Directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud –OMS sobre la calidad del aire para periodos de exposición prolongados.....	60
Figura 20. Ocupación de los encuestados	98
Figura 21. Información sobre la calidad del aire en la Institución.....	98
Figura 22. Nivel de aceptación de la implementación de sistemas de monitoreo de calidad del aire	99
Figura 23. Percepción de la calidad del aire sobre la salud.	100
Figura 24. Acceso a la información sobre calidad del aire	100

Figura 25. Percepción sobre las mejoras para aumentar la efectividad de los sistemas de monitoreo.	101
Figura 26. Percepción sobre el desarrollo de proyectos de monitoreo de calidad del aire.	102
Figura 27. Iniciativa sobre participación de proyectos en Red	103
Figura 28. Percepción sobre la facilidad del uso de sistemas de monitoreo.	104
Figura 29. Tipos de capacitación para los sistemas de monitoreo	104
Figura 30. Percepción de los expertos sobre el estado actual del monitoreo de calidad del aire en Colombia	107
Figura 31. Número de estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia	108
Figura 32. Retos técnicos y operativos de proyectos de monitoreo de calidad del aire en Colombia.....	109
Figura 33. Características potenciales de aplicación de tecnologías IoT en la medición de Calidad del aire.....	111
Figura 34. Recomendaciones de los expertos para las estaciones IoT de bajo costo....	112
Figura 35. Ideas por parte de los expertos para mejorar los proyectos de Estaciones IoT de bajo costo.....	114
Figura 36. Esquema funcional de la propuesta de transformación.	134

Índice de tablas.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.	59
Tabla 2. Índice de Calidad del Aire (ICA).....	59
Tabla 3. SVCA en Colombia, de acuerdo con la tecnología de medición.....	63
Tabla 4. Operacionalización de Variables	70
Tabla 5. Métodos aplicados para la obtención del conocimiento teórico.	78
Tabla 6. Cronograma de acciones	89
Tabla 7. Estaciones de monitoreo de calidad del aire seleccionadas	95
Tabla 8. Nomenclatura e identificación de los expertos	106
Tabla 9. Retos percibidos por los Expertos sobre el monitoreo de la Calidad del aire en Colombia.....	109
Tabla 10. Característica aprovechable de implementación de tecnologías IoT en proyectos de medición de calidad del aire.	110
Tabla 11. Recomendaciones de estrategias que se deben adoptar en estaciones IoT por parte de los expertos.....	112
Tabla 12. Ideas propuestas por los expertos en proyectos de calidad del aire de bajo costo con IoT.....	113
Tabla 13. Estadísticas RMCAB para la estación Puente Aranda.....	117
Tabla 14. Estadísticas aqicn para la estación Puente Aranda.....	117
Tabla 15. Comparativa y correlación de los datos de la estación Puente Aranda.....	118
Tabla 16. Estadísticas RMCAB para la estación Las Ferias.....	120
Tabla 17. Estadísticas aqicn para la estación Las Ferias.....	120
Tabla 18. Comparativa y correlación de los datos de la estación Las Ferias.....	121
Tabla 19. Estadísticas SISAIRE para la estación Santa Elena.....	122
Tabla 20. Estadísticas aqicn para la estación Santa Elena	123
Tabla 21. Comparativa y correlación de los datos de la estación Santa Elena	123
Tabla 22. Estadísticas SISAIRE para la estación Tanques la Ye.....	125
Tabla 23. Estadísticas aqicn para la estación Tanques la Ye	125
Tabla 24. Comparativa y correlación de los datos de la estación Tanques la Ye	126
Tabla 25. Fases de la metodología	134
Tabla 26. Acciones vinculadas a la Fase 1.....	135

Tabla 27. Ficha de diagnóstico para la instalación de Estación IoT	137
Tabla 28. Acciones vinculadas a la Fase 2.....	139
Tabla 29. Lista de chequeo de verificación técnica para la implementación.....	140
Tabla 30. Acciones vinculadas a la Fase 3.....	141
Tabla 31. Formato de seguimiento a talleres de formación	142
Tabla 32. Acciones vinculadas a la Fase 4.....	143
Tabla 33. Matriz de validación y análisis comparativo.....	144
Tabla 34. Acciones vinculadas a la Fase 5.....	145
Tabla 35. Plan de socialización y colaboración interinstitucional	146
Tabla 36. Acciones vinculadas a la Fase 6.....	148
Tabla 37. Matriz de evaluación y mejora continua	149
Tabla 38. Indicadores, criterios y productos vinculados a los objetivos y fases.....	150
Tabla 39. Perfiles de los expertos validadores de la propuesta.....	152
Tabla 40. Validez y juicio por parte de los Expertos	153

INTRODUCCIÓN

La adopción de tecnologías emergentes como el Internet de las cosas (IoT) para el desarrollo de proyectos ambientales es esencial, especialmente en contextos educativos como las instituciones de educación básica y media (Colegios) e instituciones de educación superior (Universidades), tanto del orden público como privado en el territorio colombiano, donde continuamente se presentan desafíos ambientales. Esta investigación se centra en el diseño de una Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas, con una vocación hacia el fortalecimiento del desarrollo de proyectos de medición de calidad del aire hacia el mejoramiento de la permanencia de las personas dentro de las instituciones.

A nivel mundial, el cambio climático y la crisis ambiental ha impulsado a que los gobiernos diseñen políticas inmersas en sus planes de gobierno enfocadas hacia la sostenibilidad del medio ambiente, adaptándolas con metas de los Objetivos de desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones unidas en 2015 y que forman parte de la agenda para el 2030. El presente estudio busca aprovechar las metas pactadas a nivel internacional y nacional, así mismo, promover la conciencia ambiental a través del desarrollo de la metodología y la participación de las comunidades de instituciones académicas tanto públicas como privadas puedan implementarlas en sus proyectos de índole ambiental y de calidad del aire.

Este trabajo se organiza en cuatro capítulos, el primer capítulo aborda el planteamiento y la formulación del problema, los objetivos y justificación de la investigación, teniendo en cuenta la necesidad de fortalecer el uso de las estaciones de bajo costo soportadas con tecnologías emergentes como el IoT. El segundo capítulo se desarrolla en el marco teórico y conceptual, abordando los fundamentos sobre la calidad del aire, sostenibilidad ambiental, los sistemas IoT y las políticas públicas ambientales. En el tercer capítulo se expone el diseño metodológico, los diversos instrumentos aplicados tanto para el análisis de la información como para los resultados obtenidos. Finalmente, el cuarto capítulo presenta la propuesta metodológica estructurada, validada

por expertos tanto académicos como del área ambiental, seguido de las conclusiones y recomendaciones orientadas a mejorar los proyectos de monitoreo ambiental desde un enfoque educativo e innovador.

Capítulo I. Proyección de la Investigación.

El presente capítulo aborda los elementos fundamentales que sustentan el desarrollo de esta tesis doctoral, la cual se orienta al diseño de una metodología integral basada en el uso de tecnologías IoT para la optimización de la medición de variables ambientales de bajo costo, incluyendo las variables que intervienen en la determinación de la calidad del aire en Colombia.

En este sentido, el interés de abordar esta problemática se enmarca dentro de un contexto en donde la contaminación del aire genera grandes dificultades para la salud pública y el medio ambiente, la investigación se enfoca en las bondades que pueden ofrecer las estaciones de monitoreo de bajo costo instaladas en instituciones tanto públicas como privadas, que pueden ayudar a la medición de las variables y así proporcionar información útil para desarrollar políticas internas y públicas que ayuden a mitigar la calidad del aire que se respira en Colombia.

Finalmente, este capítulo incluye el planteamiento del problema, en donde se expone el estado actual de los sistemas de monitoreo en cuanto a su sostenibilidad, conectividad y precisión. Asimismo, se formula la pregunta de investigación, los objetivos, la justificación, y el objeto de estudio, proporcionando los elementos necesarios para desarrollar el marco teórico y metodológico de esta tesis doctoral, con el fin de contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y al diseño de políticas públicas fundamentadas en datos confiables.

1.1. Línea de investigación de la Universidad de Innovación e Investigación de México y su ámbito de estudio.

Este trabajo se enmarca en la línea de investigación "Medio ambiente, calidad y prevención" de la Universidad de Investigación e Innovación de México, al proponer una Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas durante el periodo 2023 – 2025.

Este enfoque contribuye a los objetivos estratégicos de la línea, ya que promueve la gestión eficiente de la calidad del aire y la implementación de

procedimientos y protocolos preventivos, fundamentales para reducir los riesgos asociados a la contaminación atmosférica.

1.1.1. Importancia del tema en el contexto.

La investigación sobre el monitoreo de la calidad del aire es crucial debido al impacto creciente de las actividades humanas, como el uso de combustibles fósiles y los procesos industriales, actividades que contribuyen con la contaminación atmosférica. Este tema despierta gran interés en sectores clave como la academia, los entes reguladores y las comunidades, quienes buscan soluciones para mitigar estos efectos y promover espacios saludables.

En el contexto colombiano, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, titulado “Colombia Potencia Mundial de la Vida”, incluye estrategias para la Gestión Integral de la Calidad del Aire, que establecen políticas para el control de la contaminación atmosférica y la reducción de emisiones, en línea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11, orientado a ciudades inclusivas, seguras y sostenibles. Este enfoque destaca la necesidad de fortalecer las capacidades de monitoreo ambiental en el país.

Por otro lado, Colombia cuenta con una amplia red de instituciones educativas, incluyendo 298 universidades (Sistema Nacional de Información de la Educación Superior (SNIES), 2024) y 18,000 colegios (Barbosa, 2024), que representan una población estudiantil de aproximadamente 10.5 millones de estudiantes. Estas instituciones, tanto públicas como privadas, pueden beneficiarse de herramientas accesibles como las estaciones de monitoreo de bajo costo basadas en tecnología IoT, promoviendo conciencia ambiental y mejorando la gestión de la calidad del aire en sus instalaciones.

Según un informe publicado por Statista (2024), la tecnología IoT, cuenta con más de 17 mil millones de dispositivos conectados a nivel mundial y proyecciones de duplicar esta cifra para 2030, este tipo de tecnologías ofrece una solución innovadora y económica para conectar estaciones de monitoreo y recopilar datos en tiempo real. Esto no solo permite cerrar brechas en el acceso a información crítica sobre calidad del aire, sino que también facilita la implementación de políticas preventivas y la toma de decisiones basada en evidencia.

1.2. Planteamiento del problema.

Desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, el avance de la industrialización y las nuevas tecnologías ha dado lugar al desarrollo de máquinas y equipos destinados a mejorar la eficiencia y velocidad de los procesos. Sin embargo, estos avances inicialmente no tuvieron en cuenta el impacto sobre el medio ambiente y la afectación de la salud de los humanos. En muchas ocasiones, los inventores y/o desarrolladores solo se centraron en que sus dispositivos cumplieran con la finalidad de realizar las tareas sin importar las emisiones y los efectos adversos que pueden provocar a los seres vivos.

El estudio y monitoreo de la calidad del aire ha sido una prioridad desde el año 1970, principalmente en Norteamérica, iniciándose formalmente con la promulgación de la Ley de Aire Limpio en los Estados Unidos en 1970, que permitió a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establecer los Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS). Estos estándares sirvieron de guía para el monitoreo y protección de la salud pública y el medio ambiente. Países como Canadá y México tomaron como referencia esta ley en el año de 1971, adaptando regulaciones similares para minimizar los efectos nocivos de la contaminación del aire. Desde entonces, países de América Central y América Latina han tomado como modelo de referencia estas leyes y las han ajustado y actualizado a sus propias necesidades de calidad del aire con el fin de mejorar el medio ambiente y proteger la salud de sus ciudadanos. (Peralta et al., 2023).

Sin embargo, a medida que el marco regulatorio se ha actualizado con el tiempo, los sistemas de monitoreo de la calidad del aire presentan varios desafíos, entre ellos y más persistentes es la actualización de los sistemas de manuales a automáticos, traduciéndose en la obsolescencia de los equipos y sumándose a ello el alto costo de la reposición de los equipos y sensores (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022, p. 26), estos últimos en la mayoría debido a una falta de un protocolo o plan adecuado de operación y mantenimiento en el tiempo, lo que puede llegar a tener una baja confiabilidad de los datos.

En este sentido, surge la necesidad de implementar tecnologías emergentes, como lo es el Internet de las Cosas (IoT), tecnología que permite obtener de una forma económica y en tiempo real los datos, permitiendo la integración de múltiples sensores

en las estaciones de monitoreo a través de su escalabilidad. De este modo, las autoridades y gobiernos locales mediante el análisis de los datos y variables podrían diseñar políticas públicas eficientes encaminadas a la prevención de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire.

En la actualidad, el transporte basado en motores de combustión interna, utilizado en automóviles, camiones, motocicletas y maquinaria industrial, continúa siendo una fuente predominante de contaminación atmosférica. Estos motores emiten diversos contaminantes, incluyendo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), que representan un grave riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. (Singh et al., 2021).

Brook et al. (2004) demostraron a través de la consulta de diversas investigaciones epidemiológicas que la exposición tanto a corto como a largo plazo a las concentraciones actuales de partículas en suspensión en el ambiente está directamente relacionada con un aumento significativo en el riesgo de sufrir episodios cardiovasculares. Estos hallazgos subrayan la importancia de contar sistemas de monitoreo de calidad del aire, como las estaciones que emplean tecnología IoT, para la identificación temprana de niveles críticos de contaminación. La implementación de estas estaciones en instituciones públicas o privadas no solo permitiría un mejor control de la calidad del aire, sino que también contribuiría a prevenir enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica, tales como las patologías cardiovasculares.

Un estudio reciente realizado por Gouveia et al. (2024), evaluó la exposición a corto plazo al material particulado fino (PM_{2.5}) y su asociación con la mortalidad cardiovascular y respiratoria en 337 ciudades de 9 países latinoamericanos. Este análisis, basado en 3.026.861 muertes cardiovasculares y 1.222.623 muertes respiratorias, correspondientes al 41% de la población de América Latina, reveló un aumento en el riesgo de mortalidad entre 0,5% y 3%, dependiendo de la edad y el sexo. Las asociaciones más significativas se observaron en la mortalidad cardiovascular, lo que resalta el impacto grave de la contaminación del aire en la salud pública. Estos hallazgos

subrayan la necesidad crítica de implementar sistemas de monitoreo continuo y en tiempo real para evaluar los contaminantes atmosféricos y optimizar la toma de decisiones en la gestión ambiental, particularmente en zonas con alta vulnerabilidad. Además, refuerzan la importancia de un protocolo sólido para aprovechar las estaciones de monitoreo de calidad del aire, que permita no solo la vigilancia, sino también la intervención preventiva.

En un estudio de Gamboa et al. (2023), se desarrolló un sistema de calibración y evaluación del desempeño de sensores de bajo costo, comparando sus resultados con los analizadores de referencia. El estudio evaluó tres tipos de sensores: CO, O₃ y SO₂, bajo parámetros de desempeño como la deriva de línea base, linealidad, precisión, sesgo, exactitud, tiempo de respuesta, interferencia de gases y deriva a largo plazo. Los resultados indicaron la necesidad de calibraciones periódicas para mantener mediciones confiables, determinando que los sensores de CO requieren calibración cada 60 días, los de O₃ cada 30 días y los de SO₂ cada 15 días. Estos hallazgos destacan la importancia de establecer protocolos sólidos para la calibración y validación de los datos, asegurando la durabilidad y fiabilidad de los sensores en las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Este enfoque es clave para prolongar la vida útil de los sensores y optimizar los recursos dedicados a la medición ambiental, especialmente en estaciones con tecnología de bajo costo.

El costo de implementación de una estación de monitoreo de la calidad del aire, que posea diferentes sensores de bajo costo para el monitoreo de Material Particulado PM₁₀, PM_{2.5}, CO y CO₂, puede iniciar desde los \$250 dólares (Ali et al., 2021), adicionalmente, es necesario contratar un servicio de internet para el envío de la información tendría un costo \$150 dólares adicionales, lo que se traduce en que una estación de monitoreo funcional para 1 año de operación podría estar comprendido alrededor de los \$400 dólares, lo que se considera una tarifa relación costo/beneficio bastante económica para la cantidad de información que se puede recolectar y analizar con el fin de promover acciones y políticas que ayuden a mitigar la contaminación ambiental y a prevenir las enfermedades que aumentan su riesgo debido a este tipo de polución del aire.

La falta de un protocolo de mantenimiento y aprovechamiento, limitan los beneficios de estaciones de monitoreo de calidad del aire sean de alto o bajo costo, lo anterior teniendo en cuenta que después de la instalación de estos dispositivos, el equipo humano responsable de ellos en muchos casos no tienen en cuenta un plan de mantenimiento y/o protocolo que permita su longevidad en el tiempo, traduciéndose en el deterioro de la estación, dando como resultado lecturas erróneas de los sensores y finalmente, la salida de operación de la estación en menos tiempo del que fue proyectado.

Una estación con tecnología IoT de bajo costo permite conocer indicadores de la contaminación, de tal manera que sería posible establecer protocolos preventivos en aquellas instituciones públicas o privadas que presentan una mayor concentración humana y se ubican en sitios altamente contaminados.

Actualmente, existen sistemas y proyectos en marcha orientados a la medición de agentes contaminantes presentes en el aire. Algunos dispositivos siguen la "Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud" (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021a), que proporciona valores de referencia y orientación para la medición y evaluación de la calidad del aire con el fin de proteger la salud pública. Sin embargo, otros sistemas solo se limitan a medir variables y publicar sus resultados para la comunidad.

En la actualidad, según el informe de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2022), existe un alto grado de interés por parte de diferentes instituciones públicas y privadas, entre ellas entidades estatales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) y Autoridades Ambientales, entidades académicas y de Investigación, Organismos Internacionales como la OMS, gobiernos locales y regionales, sector privado e industrial e incluso la misma ciudadanía y sociedad civil, que están interesadas en ejecutar proyectos sobre la medición de la calidad del aire en sus instituciones, sin embargo, existen diversos limitantes para su puesta en marcha y éxito, mientras que algunos de ellos puede ser por falta de recursos económicos, falta de conocimiento sobre la tecnología para su implementación, por otro lado, las instituciones que si las pueden

implementar, tienen dificultades con el seguimiento, mantenimiento y protocolos para tener una sólida base de los datos y análisis de información para la toma de decisiones y acciones que ayuden a mitigar el impacto sobre las personas.

1.3. Formulación del problema (Pregunta de investigación).

¿Cómo se puede contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas?

1.4. Justificación.

Desde el punto de vista teórico, es importante diseñar un protocolo integral del manejo y monitoreo de estaciones de calidad del aire que utilicen tecnologías IoT, con el objetivo de gestionar eficazmente la calidad del aire ambiental en instituciones colombianas. Este enfoque permitirá validar normatividades actuales sobre la gestión ambiental y la integración de tecnologías IoT, lo que permitirá establecer los protocolos adecuados para la gestión de información.

Se analizarán las diversas reglamentaciones nacionales adoptadas por diferentes gobiernos respecto a los niveles permisibles del material particulado suspendido en el aire, asimismo, se tomará en cuenta las recomendaciones pertinentes para establecer un marco referencia comparativo entre las normas y leyes que cada país han adoptado en relación con la calidad del aire.

Cada país debe implementar acciones, políticas y normativas que garanticen el bienestar de sus ciudadanos en temas relacionados con la salud pública, la calidad del aire y el cumplimiento de los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS), especialmente los relacionados con “Salud y bienestar” y “ciudades y comunidades sostenibles”. Estas acciones deben estar encaminadas en la promoción, prevención y ejecución de medidas que sigan las *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*.

Desde el aspecto práctico, el diseño de la metodología de aprovechamiento y monitoreo de variables ambientales y calidad del aire permitirá contribuir con una mejora significativa en la gestión ambiental en instituciones tanto públicas como

privadas mediante el uso de tecnologías IoT. Adicionalmente, esta metodología contribuirá al desarrollo de protocolos específicos de mantenimiento y calibración de los sistemas de monitoreo, garantizando la precisión de la información, incluso para sistemas de medición de bajo costo. Asimismo, fomentará dentro de la comunidad académica la confiabilidad de los datos generados, optimizando los recursos y minimizando los costos de sustitución, lo que incrementa la sostenibilidad de los proyectos a mediano y largo plazo. Finalmente, esta metodología, incentiva la generación de conocimiento práctico aplicable a otros sectores y regiones, facilitando su replicabilidad, adaptabilidad y escalabilidad de los sistemas por parte de las instituciones, y así generar transferencia de conocimiento tanto de la gestión ambiental y tecnológica, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la salud y el bienestar, así como con ciudades inteligentes y comunidades sostenibles.

Desde el aspecto social, esta metodología ofrece a las instituciones educativas colombianas, tanto públicas como privadas, una herramienta efectiva para evaluar y gestionar la calidad del aire en sus instalaciones. Esto es especialmente relevante considerando que estudiantes y personal académico pasan una tercera parte del día en estos escenarios. Al identificar las causas internas o externas de una calidad del aire no óptima, las instituciones podrán implementar acciones correctivas internas o colaborar con autoridades locales en áreas de salud y medio ambiente para mitigar los riesgos asociados.

Además, desde un enfoque educativo, esta metodología permite integrar la conciencia ambiental en las aulas, fomentando proyectos y actividades que promuevan el bienestar de la comunidad académica y de los habitantes del área circundante. De esta manera, se genera un impacto positivo directo en la calidad de vida de los estudiantes y la comunidad, y se contribuye a una sociedad más consciente y comprometida con la sostenibilidad ambiental.

Desde el punto de vista metodológico, esta investigación plantea el desarrollo y aplicación con un enfoque integral para el aprovechamiento de las estaciones de monitoreo y de calidad del aire mediante la integración de tecnologías IoT. Esto no solo permitirá innovar en la forma en que se gestionan y operan estos sistemas, sino que

también contribuirá al diseño y validación de nuevos protocolos que garanticen la precisión, sostenibilidad y eficacia de las estaciones de monitoreo.

Desde el punto de vista personal (del área de estudio) ambiental y la calidad del aire, la realización de la presente investigación permitirá establecer una base sólida para el uso eficiente y sustentable de las estaciones de medición y monitoreo de variables ambientales integrando tecnología IoT y sensores de bajo costo. Esto proporcionará a las instituciones diversas herramientas y metodologías avanzadas para gestionar, supervisar y analizar la información derivada de la calidad del aire de manera más precisa. Adicionalmente, la implementación de esta propuesta permitirá a las organizaciones optimizar los recursos dedicados al monitoreo, mejorar sus procesos de toma de decisiones y diseñar políticas preventivas para reducir el impacto negativo de la contaminación en la salud pública y el medio ambiente.

1.5. Objeto de Estudio

El objeto de estudio de la tesis doctoral se basa en el diseño de una metodología integral aplicada a sistemas con tecnología IoT para optimizar el uso y la gestión de estaciones de monitoreo de calidad del aire de bajo costo en instituciones públicas y privadas en Colombia, con el objetivo de mejorar su eficiencia operativa, sostenibilidad y capacidad de respuesta frente a los desafíos ambientales actuales, analizando los datos base del periodo 2023-2025.

1.6. Campo de Acción

El campo de acción de esta investigación se enfoca en el desarrollo de protocolos específicos para el mantenimiento y calibración de los sensores en estaciones de monitoreo, con el objetivo de optimizar su operación y garantizar su sostenibilidad a lo largo del tiempo. Estos protocolos son fundamentales para asegurar la fiabilidad de los datos recopilados, prolongar la vida útil de las estaciones y mejorar la trazabilidad de las mediciones ambientales. A través de estos procedimientos, se busca generar patrones de comportamiento que permitan analizar tendencias en la calidad del aire, identificar mejoras o deterioros en las condiciones ambientales y contribuir a la formulación de políticas y estrategias locales que mitiguen los impactos negativos de la contaminación.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Diseñar una metodología integral para el uso eficiente de estaciones de monitoreo de variables ambientales, basada en la integración de tecnología IoT, para mejorar su sostenibilidad, precisión de datos y gestión operativa en instituciones públicas y privadas, mediante un enfoque deductivo analizando datos base del periodo 2023-2025.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Sistematizar los fundamentos teóricos relacionados con la calidad del aire y sus principales contaminantes, el impacto en la salud pública y en el ambiente, la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo ambiental, con el fin de establecer las bases conceptuales y referenciales que sustenten la propuesta metodológica de esta investigación.
- Analizar el estado actual de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas, identificando sus limitaciones y oportunidades, con énfasis en la implementación de la tecnología IoT para la optimización de su eficiencia, conectividad y sostenibilidad operativa.
- Explicar los datos históricos disponibles en las bases de datos abiertos y de fuentes oficiales sobre variables ambientales (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , CO_2) en Colombia, determinando patrones y tendencias que respalden la importancia del monitoreo continuo.
- Formular una propuesta metodológica de protocolos y procedimientos para la optimización de la gestión operativa y el mantenimiento de estaciones de monitoreo IoT de bajo costo en instituciones públicas y privadas colombianas.

1.8. Hipótesis.

La integración y adopción de tecnologías IoT en las estaciones de monitoreo de variables ambientales y de calidad del aire en Colombia, permitirá una mejor gestión en las instituciones públicas y privadas de la información sobre la calidad del aire, asimismo, proveerá una eficiencia operativa y sostenible de las estaciones de medición. Fortaleciendo la capacidad de las respuestas de las instituciones ante los desafíos ambientales y de salud pública que enfrentan actualmente los ciudadanos del territorio colombiano. Esto podría ser validado mediante el análisis de los datos cuantitativos disponibles de los portales en línea de datos abiertos en Colombia sobre la calidad del aire, y el análisis cualitativo de los protocolos y procedimientos propuestos para la gestión de las estaciones.

1.9. Alcance temático.

Alcance teórico: El estudio se fundamenta en la investigación de fuentes documentales, como artículos científicos y tesis doctorales publicados con resultados de investigación sobre estaciones de monitoreo de variables ambientales y de calidad del aire que integren tecnologías IoT, adicionalmente, se validará el conjunto de variables relevantes que se relacionan para una óptima medición de la calidad del aire. Asimismo, se le otorgará prioridad a los artículos que tengan un enfoque relacionado con la gestión ambiental y la mejora de la calidad del aire como principios clave, con un enfoque en el impacto positivo de estas tecnologías en entornos urbanos y educativos, promoviendo un desarrollo más sostenible y saludable para las comunidades.

Alcance metodológico: Se utilizarán métodos cuantitativos y cualitativos para diseñar una metodología integral para las estaciones de monitoreo basadas en tecnología IoT, tomando en cuenta las bases de datos abiertos en Colombia. Se evaluarán las estaciones vigentes para la medición de la calidad del aire acreditadas de acuerdo con la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia y que puedan integrarse con tecnologías IoT, adicionalmente, se realizará un análisis con estaciones de monitoreo de bajo costo más utilizados en las estaciones informativas para validar su fiabilidad y operatividad a largo plazo. Además, se validaron los datos atmosféricos mediante la comparación con fuentes oficiales, como el

Sistema de Información sobre la Calidad del Aire (SISAIRE) y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), y con los portales de información de las estaciones de monitoreo de bajo costo en Colombia, para analizar la precisión de las mediciones y su correlación con estándares globales.

Alcance práctico: Esta investigación proporcionará, a través de la metodología integral, protocolos y procedimientos específicos para garantizar la fiabilidad y sostenibilidad de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de bajo costo que adopten tecnologías IoT. Estos protocolos permitirán que las estaciones operen eficientemente a lo largo del tiempo, proporcionando datos confiables para la toma de decisiones. Además, las instituciones educativas, tanto públicas como privadas, podrán adoptar estas metodologías y generar políticas internas para mejorar la calidad del aire en sus entornos. Finalmente, la metodología desarrollada ofrecerá un posible modelo a seguir que permita comparar los datos generados por las estaciones de bajo costo con mediciones de estaciones de referencia oficiales, asegurando la precisión y confiabilidad de las mediciones a largo plazo.

1.10. Delimitaciones (temporal y espacial).

Delimitación espacial: La investigación se realizó en Colombia, utilizando los datos abiertos provenientes de estaciones de monitoreo de calidad del aire que ya están en funcionamiento en diferentes regiones del país. Los datos serán tomados de estaciones ubicadas en zonas urbanas de alto impacto en términos de contaminación, como Bogotá, Medellín, Cali, y otras áreas representativas. También incluirá datos atmosféricos obtenidos de fuentes internacionales confiables como aqicn.org, así como los proporcionados por las fuentes oficiales de SISAIRE y RMCAB, para validar y contrastar la precisión de los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo de bajo costo en Colombia.

Delimitación temporal: La investigación se llevará a cabo durante el periodo 2023-2025, dividido en las siguientes fases:

Fase 1 (2023): Revisión y análisis del estado actual.

Actividades relacionadas con la fase:

Revisión de literatura en bases de datos como Scopus, Elsevier e IEEE Explorer sobre las metodologías existentes para el monitoreo de la calidad del aire que adopten tecnología IoT.

Identificación de los tipos de estaciones de monitoreo de calidad del aire existentes en Colombia y su clasificación por operación (manuales, híbridas, automáticas) y sus posibles limitaciones.

Búsqueda y recopilación de los datos históricos de las variables ambientales más representativas provenientes de las bases de datos oficiales del IDEAM como la de SISAIRES y la Red RMCAB.

Fase 2 (2024): Explicación de datos históricos y análisis de tendencias

Actividades relacionadas con la fase:

Análisis del histórico de datos recabados sobre las variables ambientales (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , CO_2) para la identificación de patrones y tendencias.

Comparación de los datos obtenidos por estaciones de bajo costo con tecnología IoT con los datos de fuentes oficiales de SISAIRES y RMCAB, con el fin de determinar la relevancia y coherencia.

Generación de conclusiones sobre la importancia del monitoreo continuo de las variables de calidad del aire y su relación con la toma de decisiones en la gestión ambiental y salud pública.

Fase 3 (2025): Formulación de la propuesta metodológica

Actividades relacionadas con la fase:

Diseño de protocolos y procedimientos asociados con la gestión operativa, mantenimiento y calibración de estaciones de monitoreo de calidad del aire de bajo costo que integren tecnología IoT.

Desarrollo de la metodología integral para optimizar la eficiencia y sostenibilidad de las estaciones, teniendo en cuenta las limitaciones y oportunidades que se hayan logrado identificar en las fases anteriores.

Capítulo II. Fundamentos Teóricos

En este capítulo son presentados los referentes teóricos y referenciales que sustentan la investigación, proporcionando el marco conceptual y normativo necesario para comprender y abordar el objeto de estudio de esta investigación de tesis doctoral.

En primer lugar, se presenta el estado del arte, se analizan antecedentes históricos y actuales en donde se exponen diferentes estudios que abordan la importancia de la medición de la calidad del aire en espacios cerrados y abiertos, los sistemas IoT implementados para su medición y posibles alternativas para su implementación. Asimismo, se presentan publicaciones de artículos científicos sobre las posibles afectaciones de la mala calidad del aire sobre la salud humana.

Posteriormente, en el marco teórico, se listan los conceptos, teorías y enfoques que fundamentan la metodología de la investigación propuesta. En el marco conceptual, se comparte la definición de los principales términos clave que se relacionan con la calidad del aire y tecnologías IoT, los cuales son esenciales para la comprensión del estudio.

Por otra parte, el marco contextual describe las características específicas del contexto colombiano en donde se enmarca esta investigación. Finalmente, en el marco legal y normativo se abordan las regulaciones aplicables que sustentan el diseño metodológico en el ámbito ambiental y tecnológico.

En síntesis, este capítulo hace parte de la columna vertebral del estudio, ofreciendo una base teórica sólida y alineada con los objetivos y la metodología de la investigación.

2.1. Estado del Arte (marco histórico y actual)

2.1.1. Marco Histórico.

La construcción del marco histórico se vincula con dos variables de investigación: La tecnología IoT y la eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire. A partir de la delimitación enmarcada por estas dos variables, se ha realizado una búsqueda estructurada en la recopilación de estudios en repositorios tales como Scopus, Elsevier, Dialnet, Scielo, Teseo, entre otras, para conocer las investigaciones y publicaciones

académicas y científicas que se han desarrollado en este campo de investigación y así determinar a qué conclusiones han llegado.

Por lo tanto, basados en esta revisión de literatura se propone una estructura para el marco histórico partiendo desde antecedentes internacionales, nacionales y locales. Este tipo de estructura permite tener una amplia perspectiva del campo de estudio de la tecnología IoT y la eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire, lo que permite tener un punto de partida para la aproximación al tema de investigación propuesto en esta tesis doctoral.

En la tesis doctoral de Alulema (2021) se desarrolló una investigación basada en el desarrollo de la propuesta de una metodología basada en técnicas de Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE) para simplificar el diseño y desarrollo de sistemas IoT. La propuesta pretende tener una mejor integración de componentes heterogéneos, lo que permite a los desarrolladores solo enfocarse en las aplicaciones IoT. Esta investigación surge como respuesta a los problemas de integración de diversos sistemas de hardware no estandarizados en los cuales los desarrolladores presentaban desafíos para su integración, lo que causa demoras en la aplicación final. Para ello dentro de la metodología se plantea la simplificación de los procesos para minimizar la complejidad y aprovechar las tecnologías maduras como la Web de las Cosas (WoT). Como resultados principales de la investigación, se diseñó la metodología MDE, en donde se plantea una arquitectura de tres capas (Física, Lógica y Aplicación), un lenguaje de dominio DSL para modelar los sistemas IoT y un editor gráfico basado en eclipse. Asimismo, los resultados de las pruebas de rendimiento validaron la capacidad de la metodología para gestionar servicios REST en nodos heterogéneos. Esta Tesis doctoral se vincula con la variable de tecnología IoT que se está abordando en esta tesis doctoral y brinda un aporte significativo sobre la necesidad de adoptar metodologías soportadas con estas tecnologías.

En el trabajo de investigación de la tesis doctoral desarrollado por Flores Roca (2020) se determinó si la eficiencia de la gestión de la calidad del aire en el área metropolitana de Lima Perú estaba relacionada con tres variables: el sistema de monitoreo de material particulado, la falta de un plan integral de renovación del parque automotor y la ausencia de la participación ciudad en temas de la calidad del aire. Esta

investigación se llevó a cabo debido a las altas concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ en el área metropolitana de Lima, Perú, las cuales superan los límites permitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que podría causar problemas a la salud de los ciudadanos. Dentro de los principales resultados que se obtuvieron de esta tesis doctoral se validó que sí existe una relación significativa entre la eficiencia de la gestión del aire y las tres variables (sistema de monitoreo, plan integral y participación ciudadana), asimismo, se identificó la ausencia de estrategias integrales para la renovación del parque automotor que emite el material particulado, finalmente, se indica que la baja participación ciudadana se debe a que las personas no tienen acceso a la información (Datos) y no existen los mecanismos adecuados para que ellos puedan participar. Esta tesis doctoral se alinea con la variable de estudio de la eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire y permite tener presente la relación de diversas variables que intervienen en el mejoramiento de los sistemas de adquisición de los datos.

A nivel nacional se encontró la tesis doctoral de Yepes G. (2023). Propone un modelo de estratificación socioeconómica para el área urbana de Bogotá, estableciendo su relación con la exposición al material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Para ello, definieron trece criterios agrupados en tres categorías:

- **Sociales:** Población migrante en los últimos cinco años, estudios universitarios finalizados, percepción de la calidad del servicio de salud y percepción de la seguridad.
- **Económicos:** Déficit de vivienda, tipo de vivienda, tasa de desempleo, acceso a internet e Índice de Pobreza Multidimensional.
- **Ambientales:** Enfermedades respiratorias prevalentes, tiempo de desplazamiento al trabajo y concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

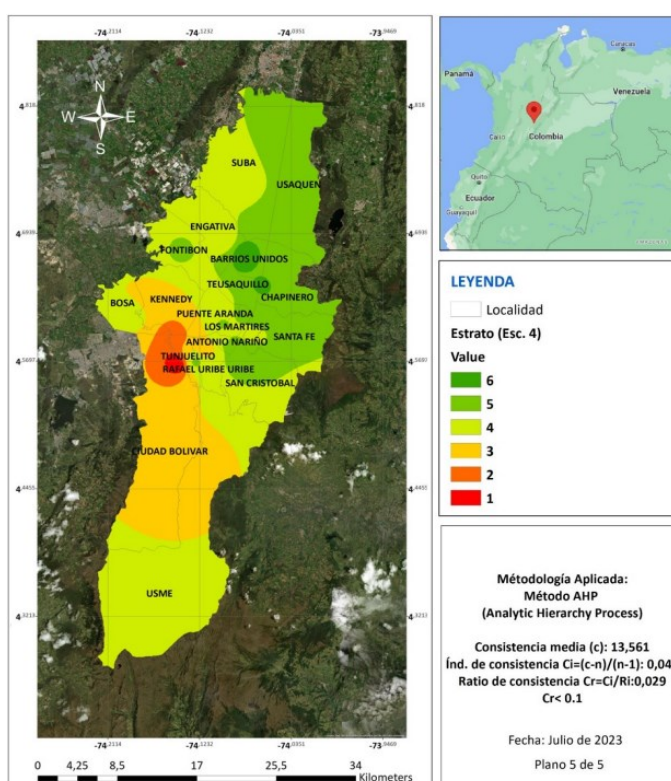
El modelo evaluó el impacto de estas variables a través de cuatro escenarios con distribución de pesos diferenciados. En el cuarto escenario, se prioriza la contaminación por material particulado, identificando que las localidades de Tunjuelito, Puente Aranda, Ciudad Bolívar, Bosa y Kennedy (estratos socioeconómicos bajos) presentaron la más alta deficiencia en calidad del aire. En contraste, localidades como Usaquén, Barrios Unidos, Santa Fe y San Cristóbal mostraron mejores condiciones ambientales.

Los resultados también evidenciaron que las localidades donde el transporte público es la principal opción de movilidad tienen niveles más bajos de calidad del aire. Sin

embargo, el modelo destacó una limitación importante: ni el DANE ni el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) incluyen variables ambientales en sus sistemas actuales de clasificación socioeconómica. En la elaboración de esta tesis doctoral manifiesta variables de interés a la hora de hacer una estratificación socioeconómica, como la calidad del aire, por tal motivo esta tesis doctoral es interesante para esta investigación, ya que incentiva estudiar variables sociales a la hora de hacer una buena medición de la calidad del aire.

Figura 1.

Estratificación Socioeconómica Propuesta para la Zona Urbana de Bogotá - Escenario 4.



Nota: El Escenario 4, representa la variable ambiental del material particulado como prioridad. Yepes G. (2023).

2.1.2. Marco Actual.

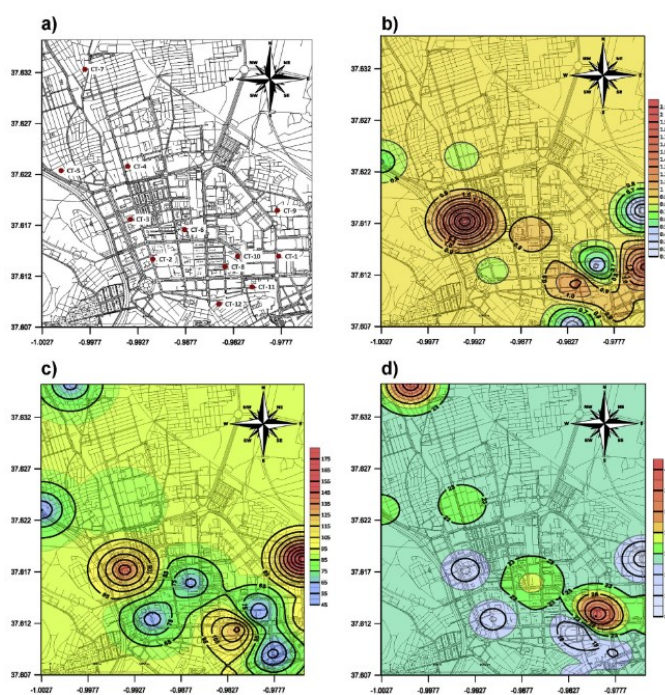
La construcción del marco actual al igual que el marco histórico se vincula con dos variables de investigación: La tecnología IoT y la eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire. A partir de la delimitación enmarcada por estas dos variables, se ha

realizado una búsqueda detallada en bases de datos indexadas como Scopus y Elsevier y así determinar cuáles son las investigaciones actuales que se abordan en torno al tema de interés de esta tesis doctoral.

En el artículo científico desarrollado por Miñarro et al. (2020), desarrolla una metodología para determinar la ubicación óptima de estaciones de monitoreo de variables ambientales, priorizando contaminantes como NO_2 , SO_2 , NO_x y CO . La metodología asigna un peso relativo a cada variable, lo que permite, mediante el uso de métodos de mínimos cuadrados, identificar las ubicaciones ideales en un conjunto de datos correspondientes a la ciudad de Cartagena, España. A través de técnicas de interpolación, se evalúan diferentes locaciones, logrando determinar puntos estratégicos que optimicen la medición conjunta de todas las variables y garanticen una cobertura geográfica adecuada. Este enfoque resulta útil para minimizar los costos asociados a la implementación de múltiples estaciones. Sin embargo, una limitación importante es que no considera ubicaciones específicas orientadas a estudios particulares, como áreas de interés para comunidades minoritarias.

Figura 2.

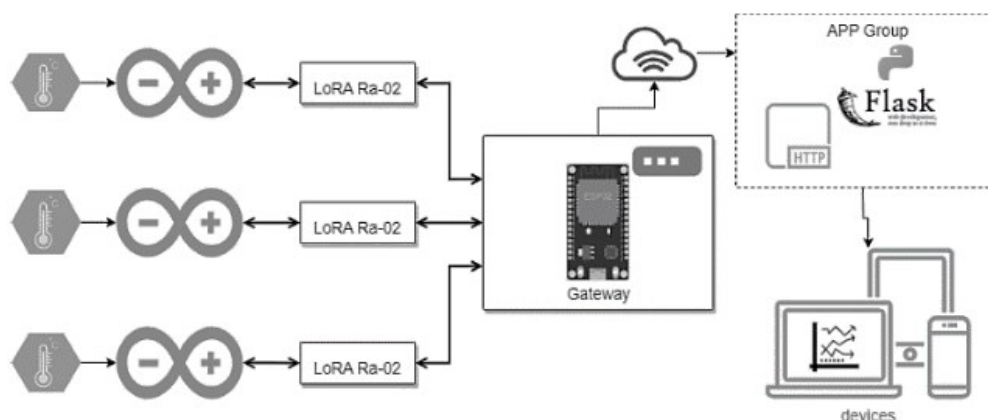
Localización de muestras difusas.



Nota: concentraciones de contaminantes en Cartagena obtenidas por interpolación Kriging para b) benceno, c) NO₂ y d) O₃. Concentraciones en $\mu\text{g m}^{-3}$ a 293 K y 101,3 kPa. (Miñarro et al., 2020).

En el artículo de investigación de Vallejo-Sánchez et al. (2024), se desarrolló un sistema basado en una arquitectura IoT para el monitoreo ambiental, con aplicaciones proyectadas en el sector minero. El estudio utilizó sistemas de bajo costo, como tarjetas Arduino Nano y sensores DHT11 para medir temperatura y humedad, combinados con tecnología LoRa para transmitir la información a una puerta de enlace basada en una tarjeta ESP32. Los resultados demuestran la versatilidad de los sistemas de bajo costo para realizar telemetría de datos y transmitir información desde ubicaciones remotas hasta un punto central. Además, los autores sugieren futuras aplicaciones en sectores como la agricultura, para optimizar cultivos, y la salud pública, con la posibilidad de evaluar la calidad del aire en tiempo real. No obstante, el estudio presenta una limitación importante al emplear solo un conjunto reducido de variables y sensores, lo que restringe su aplicabilidad a otros contextos más complejos. Este aspecto destaca la necesidad de ampliar las capacidades de los sistemas IoT para adaptarse a una mayor diversidad de aplicaciones ambientales.

Figura 3.
Diagrama de componentes.

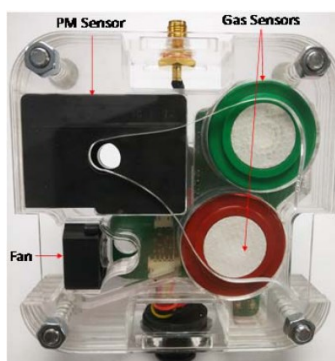


Nota: en la figura se muestra el diagrama de componentes de los sensores con los equipos LoRa y la conectividad a la puerta de enlace ESP32 (Vallejo-Sánchez et al., 2024).

El artículo de Ali et al. (2021) presenta un estudio sobre la aplicación de un sensor de bajo costo con conectividad IoT Lora WAN y calibración de sensores de calidad del aire (CO₂, NO₂ y PM_{2.5}) para la medición de variables ambientales en Auckland, Nueva Zelanda. El estudio destaca que el costo total de la estación de monitoreo, incluyendo su protocolo de comunicación y los sensores, es de 250 dólares, un precio considerablemente más bajo que los sensores convencionales disponibles en el mercado. El sistema se basa en una PCB construida con un ESP8266 y un módulo Lora WAN, con sensores para la transmisión de la información a la nube. En cuanto a la calibración de los sensores, el estudio propone dos métodos: uno en un entorno controlado de laboratorio y otro en campo, donde el sensor se calibra junto a un sensor de referencia más preciso. Para los sensores de CO₂ y NO₂, se utilizó la opción de calibración en campo, mientras que el sensor de PM_{2.5} se calibró utilizando una Red Neuronal Artificial (RNA). Aunque el estudio considera que ambos métodos son adecuados, destaca que el uso de la RNA puede ser especialmente interesante para la calibración de estos sensores. No obstante, el artículo menciona el bajo costo del hardware, pero no contempla los gastos asociados a la comunicación o al mantenimiento a largo plazo de los dispositivos, lo que limita una evaluación integral del sistema propuesto.

Figura 4.

Diseño de sensor de calidad del aire.



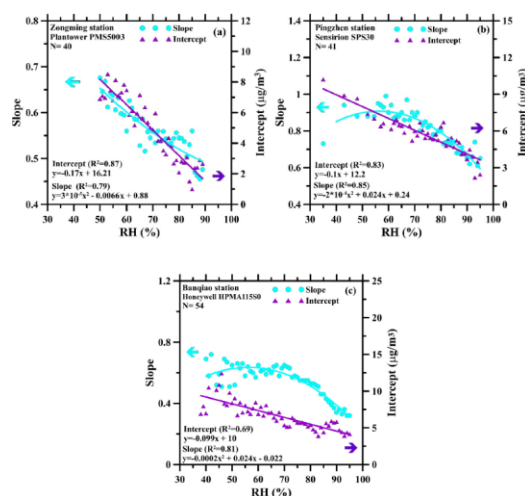
Nota: modelo experimental del sensor de monitoreo de calidad del aire. (Ali et al., 2021).

En el artículo científico de Hong et al. (2021) se presenta una evaluación y calibración a largo plazo de tres tipos de sensores de bajo costo para la medición de PM_{2.5} en estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Se realizaron pruebas de campo

durante más de un año utilizando los sensores Plantower PMS5003, Sensirion SPS30 y Honeywell HPM115S0, comparándolos con la estación de medición comercial Met One BAM-1020. Los resultados mostraron que, al aplicar técnicas de calibración como la regresión lineal multivariante (MLR) y la regresión no lineal (NLR), se lograron sesgos normales medios (MNB) de aproximadamente $\pm 10\%$ y errores normales medios (MNE) inferiores al 30% para los tres tipos de sensores de $PM_{2.5}$ en todas las ubicaciones de monitoreo. Estos hallazgos sugieren que, si se realiza una calibración adecuada, los sensores de bajo costo pueden ser utilizados para fines educativos e informativos (MNE $< 50\%$), para la identificación y caracterización de puntos críticos (MNE $< 30\%$), para el estudio de exposición personal (MNE $< 30\%$) y, incluso, para complementar los datos diarios de $PM_{2.5}$ de las estaciones de monitoreo de calidad del aire existentes (MNE $< 20\%$). Sin embargo, el estudio se centró únicamente en la recolección de datos sobre el material particulado $PM_{2.5}$, lo que deja abierta la posibilidad de incluir más sensores en investigaciones futuras.

Figura 5.

Relación de la pendiente y la intersección de la línea de regresión lineal del promedio horario de $PM_{2.5}$.

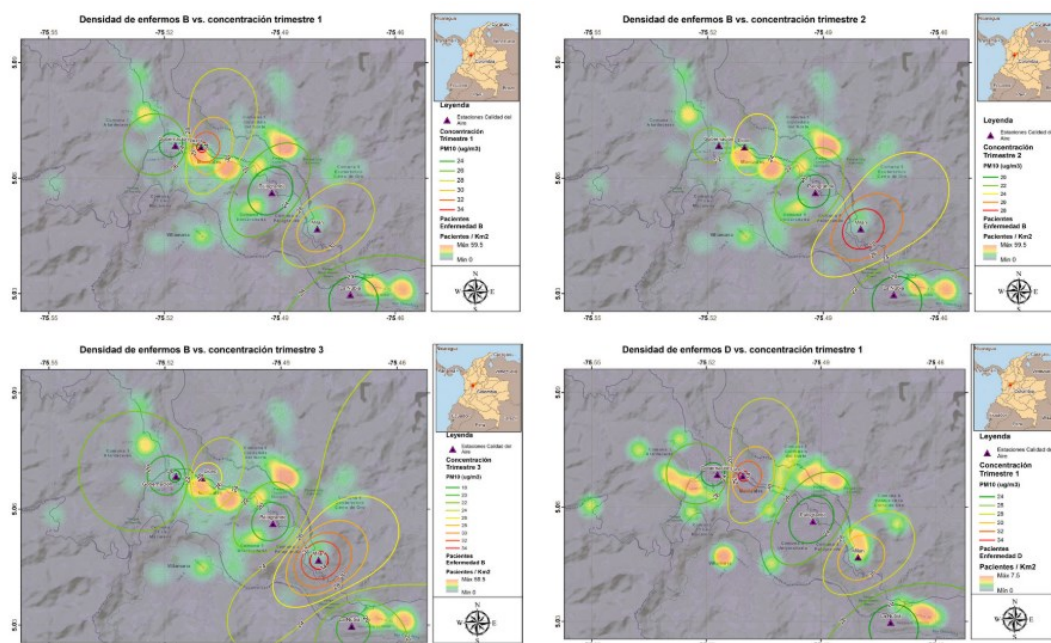


Nota: intersección de la línea de regresión lineal del promedio, (a) Plantower (b) Sensirion y (c) Honeywell en las estaciones de Zhongming, Pingzhen y Banqiao, respectivamente. (Hong et al., 2021).

En el artículo científico de Saffon et al. (2022), se estudió la correlación entre los niveles de material particulado (PM_{10}) en el aire y la frecuencia de enfermedades respiratorias como asma, bronquitis, rinitis e infecciones de vías aéreas en Manizales,

Colombia, durante el periodo 2019-2020. Según la Resolución 2254 de 2017, el límite permisible de PM_{10} en Colombia es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la OMS recomienda no exceder los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados del estudio revelaron que la rinitis fue la afección más relacionada con las concentraciones de PM_{10} en la ciudad. Además, se identificó una relación significativa entre los niveles de contaminación y la prevalencia de enfermedades respiratorias en distintos puntos de Manizales, siendo la bronquitis y la rinitis las más frecuentes, sin embargo, en el estudio ha optado por usar los datos correspondientes al año 2019 y 2020, este último un periodo atípico por la Pandemia del COVID-19 que puede presentar discrepancia en los datos analizados.

Figura 6.
Relación de enfermos con asma.



Nota: Relación de enfermos con asma y la concentración de PM_{10} por trimestre en su área de residencia. (Saffon et al., 2022).

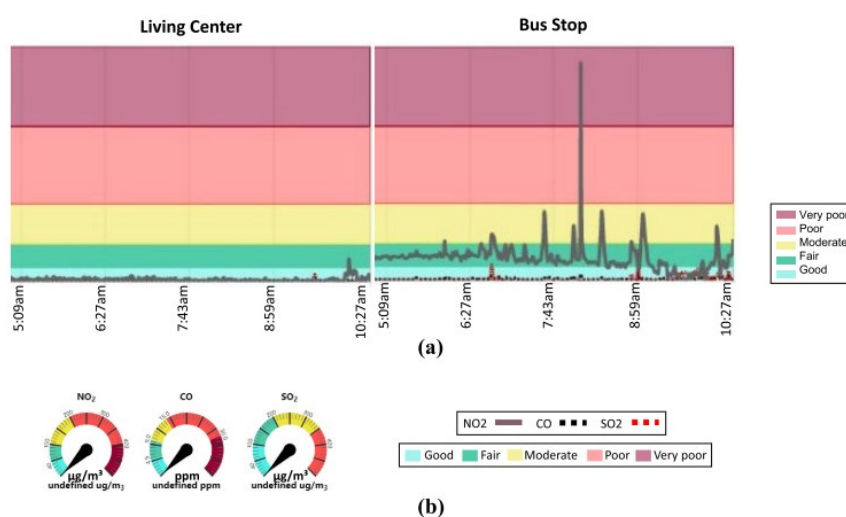
En el artículo de Mazutti et al. (2020), se describe una experiencia de monitoreo de la calidad del aire realizada en el campus principal de la Universidad de Passo Fundo (UPF), Brasil. El estudio evaluó tres contaminantes del aire: Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO_2) y Dióxido de nitrógeno (NO_2), monitoreados en dos puntos distintos del campus durante el año 2020. Estas variables están contempladas en la Ley de Aire Limpio (Clean Air Act) de 1970. Los resultados indicaron que el NO_2

presentó las concentraciones más altas en ambos puntos monitoreados, independientemente del flujo vehicular, mientras que los niveles de CO y SO₂ se mantuvieron dentro de los parámetros de “buena calidad del aire”. El estudio resaltó que el monitoreo en un entorno de campus inteligente subrayó el impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire. Además, se destacó cómo la difusión de los datos generó conciencia en la comunidad estudiantil sobre los efectos de la contaminación en la salud y el medio ambiente, promoviendo la Educación Ambiental y la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS).

Aunque el estudio demostró la utilidad del monitoreo en un entorno educativo, se identificó como una limitación la falta de mediciones de material particulado PM_{2.5}, especialmente considerando que uno de los puntos monitoreados era una parada de autobús, donde los motores de combustión interna son una fuente significativa de este contaminante.

Figura 7.

Sitio Web de monitoreo de calidad del aire AQI.



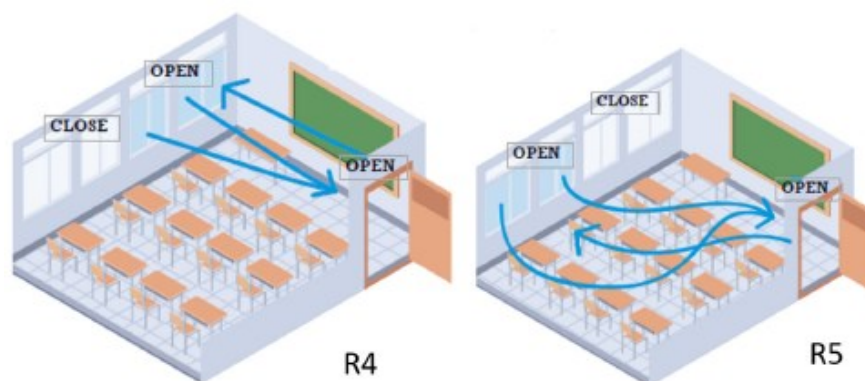
Nota: en la figura se muestra la comparación de las dos áreas medidas, a) medida histórica, b) Niveles en tiempo real. (Mazutti et al., 2020).

En el artículo científico de Sánchez-Fernández et al. (2023), se evaluaron estrategias de ventilación natural mediante el monitoreo de la calidad del aire interior utilizando sensores de CO₂. La investigación, llevada a cabo por el Instituto de Investigación ITACA de la Universidad Politécnica de Valencia, se realizó en 2019 en la

ciudad de Valencia, España. La etapa de medición del estudio, se monitorizaron ocho centros educativos para analizar la calidad del aire en las aulas. El equipo de investigación modeló diversas ecuaciones para medir variables como el tiempo de recuperación del aire, la relación entre las concentraciones de CO₂ y el volumen por persona, así como los niveles de CO₂ a lo largo del tiempo. Los resultados sugieren la implementación de estrategias de ventilación natural que permitan la renovación adecuada del aire en las aulas. En caso de no ser factible, se recomienda el uso de medidores de CO₂ conectados a sistemas de ventilación automatizados. Además, el estudio resalta la importancia de diseñar aulas con una relación adecuada entre volumen y número de estudiantes, y la necesidad de educar tanto a los alumnos como al personal docente sobre la importancia de la calidad del aire interior. Los niños, al ser más vulnerables debido a su sistema inmunológico en desarrollo y mayor tasa de respiración, son particularmente susceptibles a problemas respiratorios y efectos adversos en su desarrollo cognitivo y neurológico. La exposición a altos niveles de CO₂ puede provocar asma, afectar el rendimiento académico e incluso contribuir a problemas de salud mental, como ansiedad y depresión, subrayando la necesidad de mantener un entorno escolar saludable. Finalmente, el estudio señala como una limitación el haber considerado únicamente mediciones de CO₂, abriendo la posibilidad de incluir otros agentes contaminantes en investigaciones futuras.

Figura 8.

Ejemplo de las configuraciones de ventilación natural para medir la concentración de CO₂

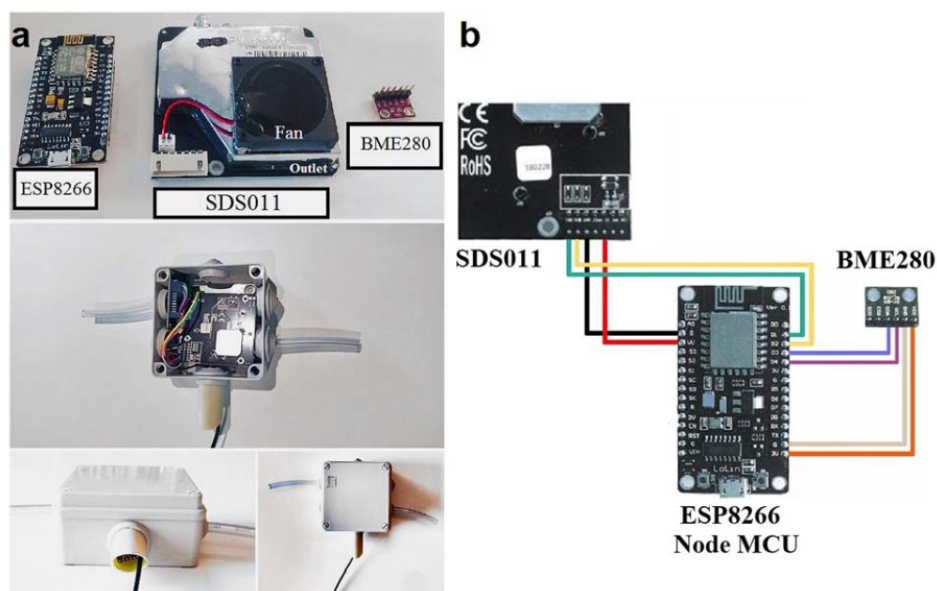


Nota: configuración R4 Puerta y ventana abierta y R5 ventilación cruzada. (Sánchez-Fernández et al., 2023).

En el artículo de Tagle et al. (2020) en donde se evaluó el desempeño de un sensor de bajo costo basado en la tecnología IoT para medir el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en Santiago, Chile; como parte del proyecto de ciencia ciudadana LoV-IoT. Con el objetivo de validar el desarrollo de un prototipo de vigilancia de material particulado en un entorno urbano, comparando los resultados con equipos de referencia regulatoria. La estación se implementó con un sensor óptico SDS011 que mide PM_{10} y $PM_{2.5}$, una tarjeta de IoT ESP8266 y un sensor de humedad y temperatura BME 280, localizando el prototipo en tres locaciones Las Condes, O'Higgins Park y Pudahuel en el periodo de invierno y primavera de 2018. En el desarrollo de la investigación se comparó con monitores de referencia BAM 1020, TEOM 1400 y Partisol 2000i. Para la validación de los datos se implementó análisis estadísticos, como la correlación R^2 y errores promedio MAE y MBA.

Figura 9.

Diseño de una estación IoT de monitoreo de Calidad del Aire.



Nota: en la figura A, se observa los equipos a utilizar y el montaje final y en la figura B, se muestra el diagrama de conexión. (Tagle et al., 2020).

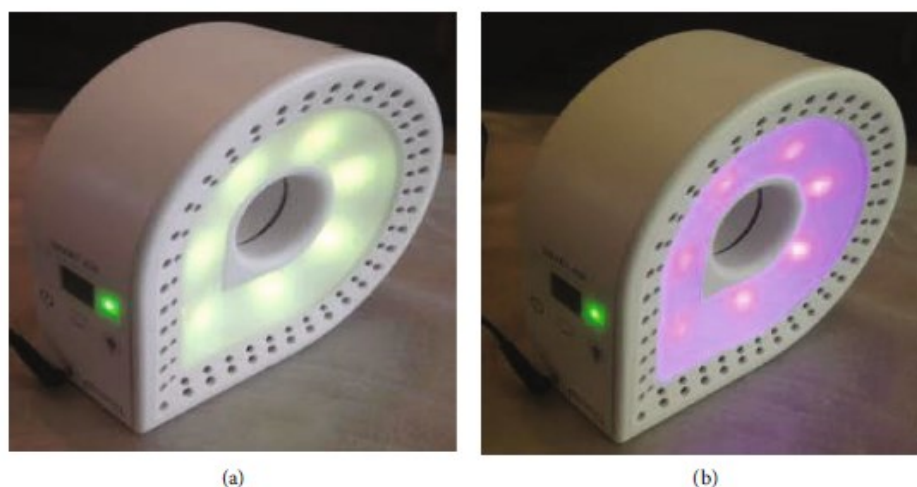
En esta investigación se obtuvieron como resultados principales una variabilidad de los sensores de bajo costo moderada, entre el 9% al 24% para el $PM_{2.5}$, mientras que para el PM_{10} estaba entre el 10% al 37%, por otra parte, se obtuvo un mejor desempeño en la correlación (R^2) para el $PM_{2.5}$ de 0.47-0.86, mientras que para el PM_{10} fue de 0.24-

0.56. Finalmente, los sensores presentan variaciones con respecto a la humedad relativa (RH), presentando sobreestimaciones en las concentraciones de PM cuando $RH > 75\%$ y subestimaciones cuando $RH < 50\%$, el sensor óptico SD011 mostró un rendimiento adecuado para medir promedios de 24 horas de $PM_{2.5}$, sin embargo se hace necesario para investigaciones futuras se realice una calibración del sensor dentro del algoritmo cuando se presenten variaciones de la RH con el fin de aumentar la precisión del sensor.

En el trabajo realizado por Jo et al. (2020), demuestra cómo se puede desarrollar un sistema eficiente, en tiempo real y accesible para monitorear la calidad del aire interior, implementando tecnologías IoT y computación en la nube. El desarrollo del dispositivo Smart-Air en conjunto con un servidor en la nube, permite hacer mediciones en tiempo real y proporcionar alertas a los usuarios a través de una aplicación móvil. El dispositivo Smart-Air, cuenta con sensores para medir material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, además de compuestos volátiles VOCs, monóxido de carbono CO, dióxido de Carbono CO_2 y temperatura y humedad. Adicionalmente, cuenta con un microcontrolador STM32 y un módulo LTE para la transmisión de los datos a la nube.

El estudio fue implementado en el Edificio de Ingeniería Civil Jaesung de la Universidad de Hanyang, ubicado en Corea del Sur. En el cual se instalaron siete dispositivos Smart-Air en diferentes lugares del edificio.

Figura 10.
Equipo Smart-Air.



Nota: Equipo Smart-Air (a), cuando la calidad del aire es buena, Smart-Air (b), cuando la calidad del aire no es adecuada. (Jo et al., 2020).

Los resultados del estudio demostraron una alta fiabilidad de los sensores en la detección de contaminantes clave. Las comparaciones de los sensores de bajo costo del dispositivo Smart-Air versus sensores certificados como GRIMM 1109 y Testo-535, se destacan las medidas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ son prácticamente iguales $93-97\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con el equipo GRIMM 1109, por otra parte, el sensor VOC presentó una linealidad casi perfecta con un coeficiente de determinación de $R^2=0.9996$, mientras que el sensor de CO mostró un comportamiento similar, con $R^2=0.9997$. Demostrando que el sistema es efectivo para el monitoreo de la calidad del aire interior en tiempo real y de manera remota. Las mejoras futuras propuestas por los investigadores consisten en la integración de sistemas de ventilación automática para mejorar la calidad del aire de acuerdo con las mediciones del equipo Smart-Air.

En el artículo realizado por Saini et al. (2021), presenta una revisión sistemática de sensores de bajo costo utilizados en Sistemas IoT para el monitoreo de la calidad del aire interior (IAQ). Con el objetivo de proporcionar un análisis cualitativo y cuantitativo de sensores económicos para el monitoreo de la calidad del aire y con la finalidad de apoyar a investigadores a seleccionar las tecnologías adecuadas para el monitoreo en tiempo real. La revisión sistemática incluye el análisis de los parámetros medidos, como también las especificaciones técnicas de los sensores, costos, calibraciones y limitaciones de los dispositivos.

La metodología realizada para la revisión sistemática abordó la consulta en bases de datos como Web of Science, IEEE Explore, ScienceDirect y PubMed; incluyendo criterios de inclusión de artículos publicados después del año 2015, que estuvieran escritos en idioma inglés, y que estuviesen relacionados con IAQ y tecnologías IoT. En los resultados obtenidos en la búsqueda, se examinaron en total 40 estudios relevantes sobre sensores IAQ, y se incluyeron las especificaciones técnicas de los sensores más usados en los estudios para analizar y comparar el rango de medición, precisión, tiempo de respuesta y costos.

Los resultados obtenidos de la revisión sistemática se pueden enmarcar en las siguientes categorías de análisis:

Tipos de sensores analizados: Los sensores térmicos más comunes para medir la temperatura y humedad fueron los DHT11, DHT22 y BME 280. Por otra parte, para la

medición de material particulado los más usados fueron los sensores Sharp GP2Y1010AU0F y PMS5003, mientras que para la medición de gases, la serie MQ (MQ135, MQ7) es la gama de sensores ampliamente utilizados para este fin.

Parámetros de monitorización: En las publicaciones revisadas se encontró que el 70% de los estudios incluyen la medición de temperatura y humedad, mientras que el 65% incluyen la medición de dióxido de carbono CO₂ y el 30% monóxido de carbono. Por otra parte, tan solo el 27.5% de los estudios se incluyó el parámetro de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀.

Costo y accesibilidad: el 45.7% de los sensores tienen un costo por debajo de los \$20 dólares, los sensores más económicos como el DHT11 y DHT22 tiene un costo entre los \$5 y \$10 dólares. Finalmente, los sensores que representan un costo más elevado son los de gases y de material particulado, caracterizados por los que miden más de una variable.

Limitaciones Detectadas: el 77.5% de los estudios no incluyen detalles de calibración, por otra parte, el 39.4% de los sensores analizados carecen de especificaciones de precisión en sus hojas de datos. Los sensores de bajo costo requieren de una calibración frecuente, lo que puede incrementar los costos operativos.

El estudio concluye que existe una viabilidad del uso de sensores de bajo costo, sin embargo, estos requieren de una calibración y mantenimiento periódico. Adicionalmente, existe una relación entre el costo y la precisión, en especial en los sensores de partículas y gas. Asimismo, recomiendan seleccionar sensores precalibrados o con capacidades de auto calibración para aplicaciones remotas y en tiempo real. Finalmente, enfatizan en la necesidad de generar soluciones sostenibles y de bajo costo para países en desarrollo para que puedan afrontar los ODS como los relacionados con la calidad del aire.

2.2. Marco Teórico.

2.2.1. Definición de la calidad del aire.

Las condiciones de la calidad del aire se caracterizan por la concentración o ausencia de contaminantes en el aire que pueden influir en el bienestar del ser humano,

incluyendo también el medio ambiente y las actividades económicas. Según la World Health Organization (2024), los principales contaminantes presentes en el aire incluye material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO_2 , dióxido de azufre SO_2 y ozono O_3 . La fuente de contaminación del aire puede estar influenciada tanto por fuentes naturales como por la actividad humana, incluyendo los procesos industriales, el transporte y uso de combustibles fósiles.

2.2.1.1. Principales contaminantes y sus efectos.

Los agentes contaminantes en el aire pueden estar en forma de partículas o gases y que provocan un gran impacto en la salud y en el medio ambiente. Los contaminantes más importantes son:

Partículas suspendidas en el aire PM_{10} y $PM_{2.5}$: Este tipo de material microscópico (partículas menores a $10\mu m$ y $2.5\mu m$) son generadas por procesos derivados de la combustión interna de motores, procesos industriales y partículas finas de polvo. El impacto sobre la salud de las partículas presentes en el aire menores a $2.5\mu m$ ($PM_{2.5}$) son de mayor peligro, puesto que puede penetrar y fijarse en los pulmones, afectando al sistema respiratorio y cardiovascular, estudios revelan que la exposición alta y prolongada de los seres humanos sobre estas partículas pueden desencadenar enfermedades como asma, bronquitis y eventos cardiacos (Al-Kindi et al., 2020).

Monóxido de carbono CO: Es un gas tóxico que es emitido en su mayoría por los motores de combustión interna y también de los procesos industriales. El impacto que este gas tiene sobre la salud humana puede provocar falencias en el transporte de oxígeno en la sangre, dolores de cabeza, cansancio, y en exposiciones prolongadas, la muerte. (Manisalidis et al., 2020).

Dióxido de Nitrógeno NO_2 : es un gas tóxico corrosivo, provocado por la actividad humana (antropogénico) generado por los vehículos que funcionan con motor de combustión interna y procesos derivados de plantas industriales. El impacto del dióxido de nitrógeno sobre la salud humana conlleva a la irritación de las vías respiratorias y puede aumentar el riesgo de contraer infecciones pulmonares. (Dominski et al., 2021).

Ozono O₃: Es un gas incoloro, inestable y oxidante, presente en la atmósfera, en la capa troposfera (capa más baja de la atmósfera) es nocivo para la salud humana y los ecosistemas; se forma por reacciones químicas a base de otros agentes contaminantes expuestos a la luz solar. Este gas puede provocar la irritación de los ojos al igual que las vías respiratorias, provocando la reducción de la función pulmonar y otras enfermedades broncopulmonares. (Huangfu & Atkinson, 2020).

2.2.1.2. Relación entre calidad del aire y salud pública.

La exposición prolongada de los seres humanos a contaminantes presentes en el aire tiende a provocar graves consecuencias para la salud, y más aún para poblaciones potencialmente vulnerables como son los niños, adultos mayores y personas con enfermedades preexistentes, Según Organización Panamericana de la Salud (OPS) (2023) reconoce que la contaminación atmosférica es uno de los principales riesgos ambientales para la salud en América y estimó que en el 2019 alrededor de 6,7 millones de muertes prematuras anualmente se atribuyeron a los efectos de la contaminación del aire ambiente y doméstico. Adicionalmente, el 99% de la población mundial vivía en lugares donde no se logra cumplir con el nivel guía de calidad del aire de la OMS, aumentando el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón.

En el contexto educativo, se ha demostrado a través de diversos estudios que la calidad del aire tiene un efecto negativo no solo en el rendimiento académico, sino que también en el bienestar y confort de los estudiantes. Tomando como ejemplo el estudio de Sánchez-Fernández et al. (2023), denota que altas concentraciones de CO₂ en aulas que no tienen una ventilación adecuada puede incidir en la reducción de la capacidad cognitiva y el aprendizaje de los estudiantes.

2.2.1.3. Impacto Ambiental.

La contaminación presente en el aire tanto de material particulado como gases tóxicos no solo afecta a la salud humana, sino también al medio ambiente. A continuación, se presentan algunos efectos negativos que más se destacan:

Degradación de los ecosistemas: pueden afectar la biodiversidad, el desplazamiento de las especies e incluso la extinción de especies animales y vegetales.

Adicionalmente, puede afectar la productividad agrícola debido a la contaminación del suelo con sustancias químicas subproductos de las lluvias ácidas.

Cambio Climático: Los agentes contaminantes en el aire como los gases CO₂ contribuyen al calentamiento global, provocando sequías, olas de calor e inundaciones. Asimismo, genera alteraciones de los ciclos de carbono y la liberación de metano a la atmósfera.

Acidificación de los suelos: Contaminantes como el SO₂ y el NO₂ provocan lluvia ácida, afectando suelos, cuerpos de agua y estructuras construidas.

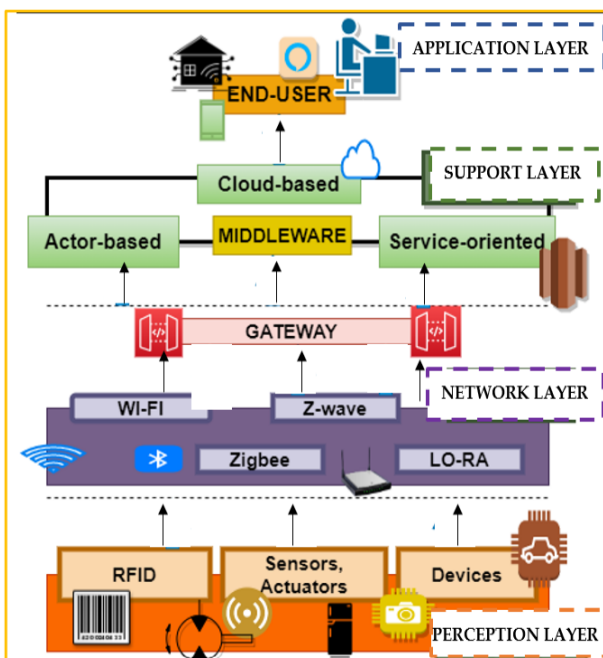
2.2.3. Definición del IoT.

El internet de las cosas (IoT por sus siglas en Inglés) según IBM (2023) se entiende como una red de dispositivos físicos, vehículos y otros objetos físicos que están integrados con sensores, software y conectividad de red integrados, lo que les permite adquirir y compartir información.

El internet de las cosas ha venido evolucionando a través del tiempo, desde sus inicios como concepto en el año de 1999, ha logrado un crecimiento exponencial, entre el año 2008 y 2010 la cantidad de dispositivos conectados a la red superó a la población mundial, para ese periodo se estimó que existían alrededor de 12.500 millones de dispositivos conectados a la red, entre ellos smartphones, Tablet, computadores y diversos electrodomésticos, cifra que casi duplica la población mundial.

La Arquitectura del internet de las cosas IoT, se puede resumir en cuatro capas, capa de captura o adquisición, capa de Red, capa de soporte y capa de aplicación.

Figura 11.
Arquitectura IoT.



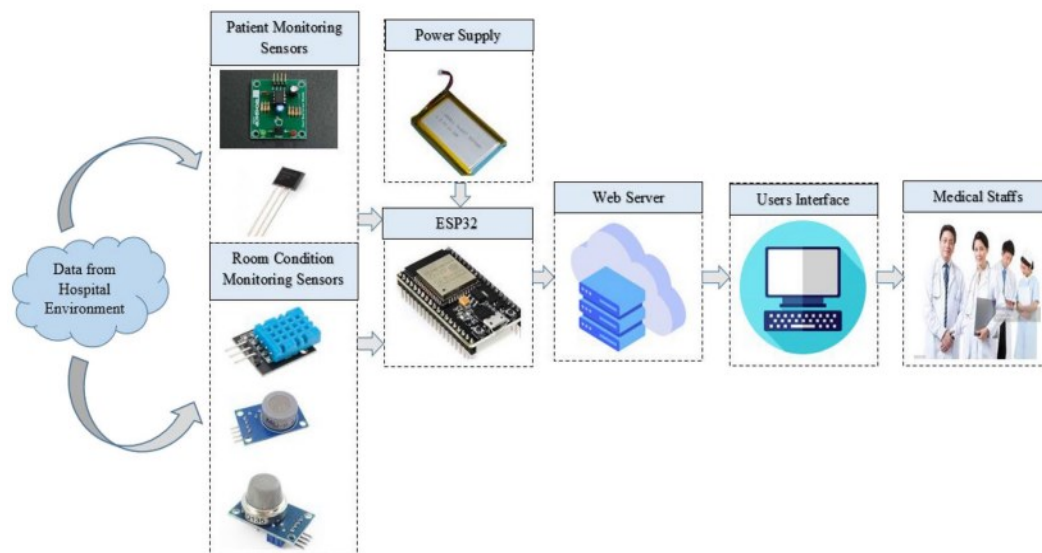
Nota: En la figura se indican las capas mínimas funcionales que debe tener un sistema de IoT. (Malhotra et al., 2021).

2.2.3.1. Arquitectura típica de un sistema IoT

Un sistema típico de IoT se compone de hardware y software. El hardware se constituye por sensores y/o actuadores para convertir las señales físicas a eléctricas en el caso de los sensores, y para el caso de los actuadores convierte las señales eléctricas a físicas. Por otra parte, el sistema tiene un microcontrolador o sistema embebido que procesa la información, la mayoría de las veces el sistema embebido tiene la posibilidad de conectarse a internet para el envío de la información, allí se procesa la información en un servidor Web, para posteriormente se visualice la información a través de la interfaz de usuario, para su visualización y/o control. En la investigación realizada por Islam et al. (2020), se valida un prototipo de sistema para el cuidado de la salud y el bienestar de pacientes con una arquitectura de IoT.

Figura 12.

La arquitectura general del sistema de monitoreo de atención médica

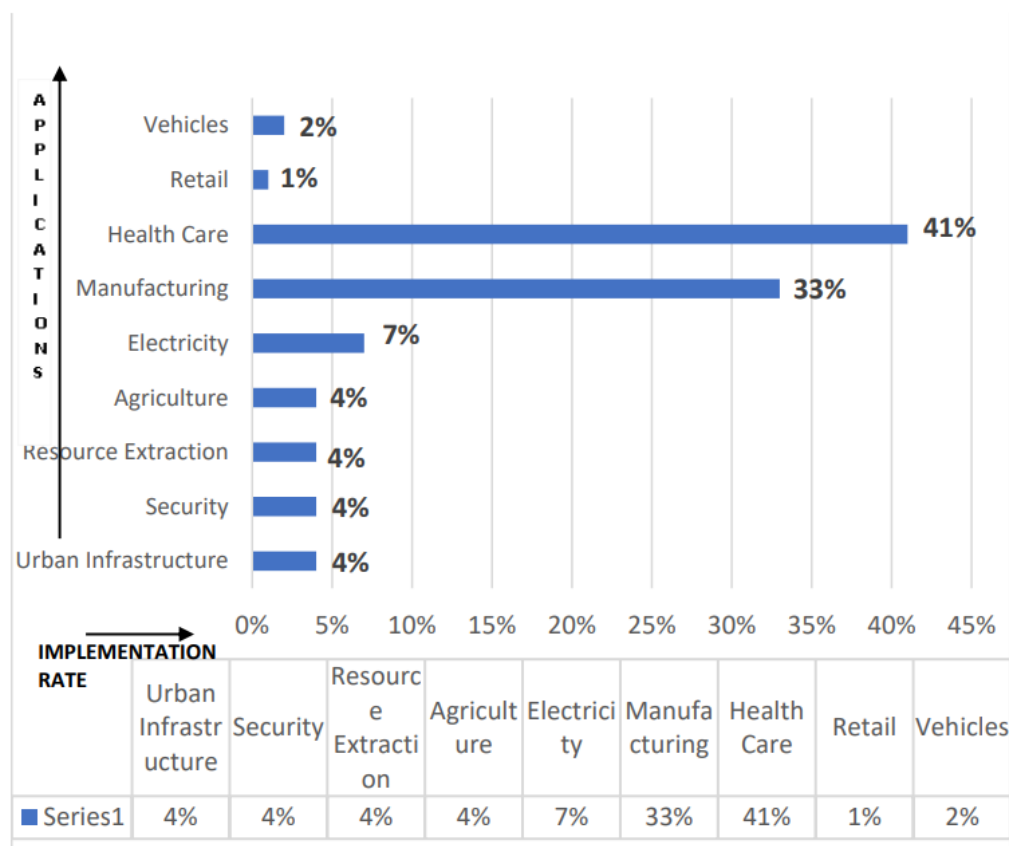


Nota: En la figura se muestran los elementos que componen cada bloque del sistema de monitoreo médico. (Islam et al., 2020).

2.2.3.2. Áreas de aplicación del IoT

En la actualidad, y en gran medida a la evolución de las redes de 4G y 5G, existe un gran número de dispositivos físicos conectados a internet, según el estudio realizado por Malhotra et al. (2021) el resultado de la conectividad y la automatización se ha manifestado en la presencia de objetos inteligentes, abriendo caminos en todas las áreas: ciudades inteligentes, salud, finanzas, manufactura, academia, entre otras. Proveyendo de numerosos beneficios en diferentes áreas de aplicación.

Figura 13.
Aplicación del internet de las cosas con aplicaciones prácticas.



Nota: Aplicación del IoT a diferentes industrias y/o servicios. (Malhotra et al., 2021).

Los servicios inteligentes se han convertido en un estilo de vida actual, y como se observa en la figura anterior, se evidencia un gran campo de aplicación en la salud y en la manufactura, por ejemplo, basándose en las señales de tráfico se puede configurar el cambio de los semáforos y así evitar la congestión y por lo tanto, la contaminación ambiental.

2.2.4. Impacto del monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas

En el artículo científico realizado por Chojer et al. (2022) se realizó un estudio enfocado en la medición de material particulado PM (PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀) durante 03 de junio de 2019 al 08 de julio de 2019, en una escuela primaria del área urbana de la ciudad de Porto en Portugal. La población objetivo del estudio fueron niños de preescolar y de primaria en donde se realizaron las mediciones con estaciones de

monitoreo que incluían sensores de bajo costo y un dispositivo de referencia de grado de investigación TSI DUSTTRAK DRX Aerosol Monitor. El estudio tuvo la finalidad de aplicar diversos métodos de calibración como la regresión lineal múltiple (MLR), la regresión de soporte vectorial (SVR) y modelos de regresión de refuerzo. Los principales hallazgos del estudio indican que, si bien los dispositivos de bajo costo pueden ser útiles para el monitoreo de la calidad del aire, estos presentan algunas limitaciones en la precisión de las mediciones. Adicionalmente, en cada una de las áreas del estudio se identificó una variación en la composición y tamaño de las partículas entre las aulas de clase y el comedor. Finalmente, el artículo denota la necesidad de realizar mediciones por tiempos más prolongados y así identificar la viabilidad del uso de los sensores de bajo costo y diseñar un protocolo de mantenimiento de las estaciones de monitoreo. Este artículo se relaciona con el objeto de estudio de la investigación puesto que se enfatiza en la medición de la calidad del aire en ambientes escolares, sin embargo, presenta una gran limitación en los resultados puesto que, así como lo afirman en las conclusiones del estudio, un periodo de tan solo 1 mes de medición no puede demostrar una sostenibilidad en el tiempo de los sensores de bajo costo para la medición de la calidad del aire.

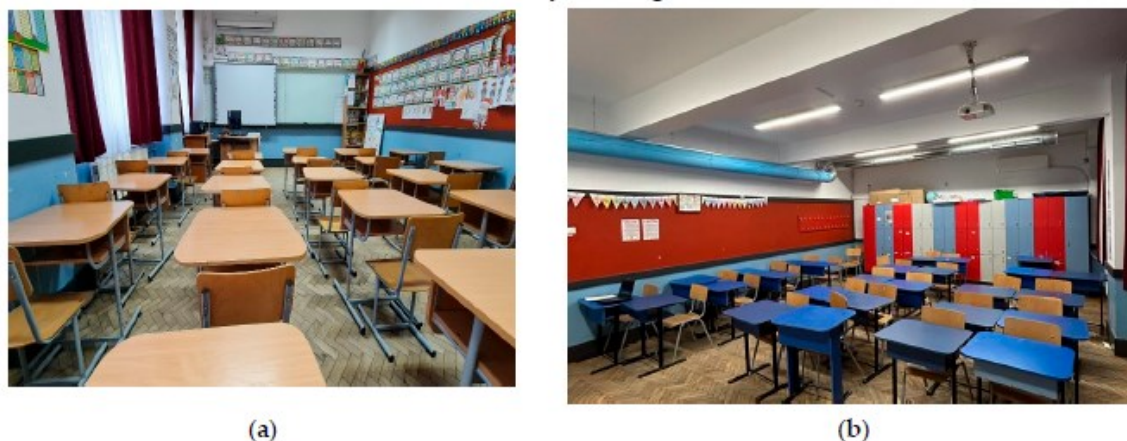
En el artículo científico de Vasile et al. (2024), se desarrolló un estudio en diferentes escuelas de Bucarest en Rumania sobre el análisis de la calidad del aire interior. La población objeto del estudio fueron niños entre 4 y 9 años, con una permanencia en las instalaciones de aproximadamente 7 horas al día. El estudio se centra en analizar el impacto de la calidad del aire sobre la salud de los niños en entornos escolares. Las variables seleccionadas en el estudio para la medición de la calidad del aire comprenden compuestos orgánicos volátiles totales (TVOCs), concentración de dióxido de carbono (CO_2), amoníaco (NH_3), material particulado $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . Por otra parte, la ventana de observación del estudio tuvo una duración de 8 meses, en donde se realizaron muestras durante las dos primeras horas de la jornada escolar y con un intervalo en las mediciones de TVOCs y CO_2 cada minuto, mientras que NH_3 y las partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} se monitorean cada 5 minutos. Los equipos que se implementaron para la medición eran de línea comercial y portátiles.

Figura 14.
Equipos de medición



Nota: Equipos de medición portátiles implementados en la medición de la calidad del aire en ambientes escolares (Vasile et al., 2024).

Figura 15.
Aulas de Clase.



Nota: (a) aulas de clase con ventilación natural, (b) aulas de clase con ventilación mecánica. (Vasile et al., 2024).

Los resultados más destacados del estudio, denota la identificación de niveles elevados de contaminantes en aire al interior de las escuelas, lo que puede tener efectos adversos para la salud de los niños como también en el aprendizaje. Además, se observó que la ventilación natural de las aulas no siempre es suficiente para mantener niveles adecuados de la calidad del aire, mientras que si se aplican unidades de recuperación de calor permiten mejorar la ventilación, traduciéndose en una mejoría del aire dentro de

las instalaciones. El estudio mencionado anteriormente es de interés para la investigación de esta tesis doctoral, puesto que permite tener bases para generar sugerencias y procedimientos para el acondicionamiento de espacios cerrados que pueda proporcionar entornos adecuados con una buena calidad del aire.

En el artículo elaborado por Langiano et al. (2024), presenta una investigación sobre la calidad del aire en las escuelas, tomando como referencia un edificio de una escuela de secundaria en Italia en febrero y marzo de 2019. El estudio se enmarca en el programa de School–Work Alternating System (PTCO), que busca mejorar las habilidades transversales y la orientación profesional de los estudiantes, y al mismo tiempo, abordar problemas de salud cruciales.

En cuanto a los propósitos, la investigación tuvo dos objetivos principales, el primero fue investigar la calidad del aire en edificios escolares y las implicaciones para la salud, fomentando la participación de los estudiantes. El segundo objetivo se basó en la evaluación del confort térmico y la medición de los niveles de dióxido de carbono CO₂, Adicionalmente, la medición de la calidad microbiológica del aire.

Para alcanzar estos objetivos, la investigación se desarrolló con la participación de 8 estudiantes bajo la supervisión de tutores, en la primera fase, en el mes de febrero de 2019 se realizó la medición en 19 aulas tanto ocupadas como vacías, con ventanas abiertas y cerradas; luego en la segunda fase, se realizó campañas de sensibilización a los estudiantes y se realizaron nuevamente las muestras.

En relación con los hallazgos más significativos, se encontró que las concentraciones de CO₂ en las aulas mostraron un promedio de 2555.5ppm en la primera fase, mientras que en la segunda fase, con la sensibilización e intervención de las aulas el promedio de la concentración de CO₂ disminuyó a 912.75ppm, denotando una mejora significativa de la calidad del aire y la participación de todos los actores a través del PTCO.

De igual manera, se identificó en ambas fases del estudio, que la ventilación tanto en aulas y pasillo fueron generalmente bajas con un promedio de 0.02m/s e incluso algunos valores fueron del 0.00m/s, lo que indica una falta de circulación de aire adecuada.

Finalmente, el estudio concluye que las altas concentraciones de CO₂ y una mala ventilación pueden afectar la salud y el rendimiento académico de los estudiantes. Este estudio aporta al desarrollo de esta tesis doctoral en la importancia del monitoreo y verificación de la calidad del aire en instituciones educativas, puesto que no solo repercute en la salud de las personas, sino también en el rendimiento académico.

2.2.5. Uso de datos satelitales para validar estaciones terrestres.

En el artículo científico elaborado por García-Delgadillo (2022), se investiga el potencial de las imágenes satelitales MODIS-MAIAC (Aerosol Optical Depth, AOD) que pueden ser obtenidos de la National Aeronautics and Space Administration – NASA, como indicadores cualitativos de la concentración de material particulado PM_{2.5} en Bogotá.

Para tal propósito, se busca establecer la correlación entre los datos obtenidos con las imágenes AOD y las estaciones de calidad del aire que están instaladas en tierra por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Actualmente en Bogotá se trabaja con 13 estaciones fijas y 1 móvil, publicando datos espaciales de interpolación para PM₁₀, PST, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO y O₃, con reportes emitidos a intervalos de una hora.

Cabe señalar que este estudio se apoya en investigaciones previas desarrolladas en diversas ciudades como Milán, Teherán, Nanjing, entre otras, obteniendo correlaciones entre 0.2 a 0.66 entre los datos terrestres y satelitales.

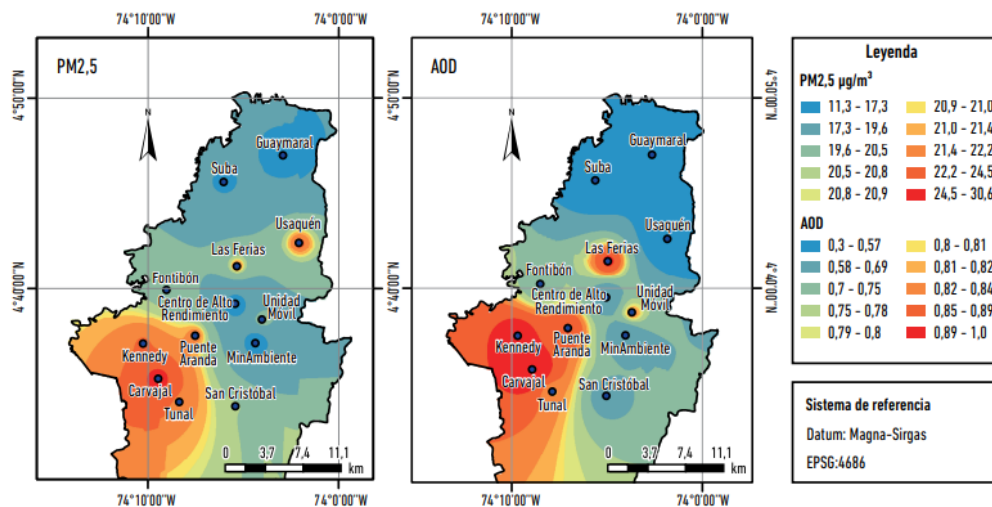
Finalmente, el estudio pretende demostrar el potencial del desarrollo del monitoreo de la calidad del aire por medio de AOD como complemento al monitoreo tradicional de la calidad del aire.

En complemento a lo anterior, el estudio también se centra en la comparación de los datos tanto de la Red de monitoreo de la calidad del aire de Bogotá (RMCAB) constituida por sus 13 estaciones de monitoreo con un cubrimiento del 23.2% de la ciudad y los datos que se pueden obtener a través de las imágenes AOD de la NASA, aplicando una correlación de los datos y así determinar la factibilidad de apoyarse en este tipo de sistemas como alternativa de monitoreo de la calidad del aire en zonas de no

cobertura de la RMCAB. Para hacer el muestreo, se toman datos en un día laboral normal y un día de aislamiento preventivo del COVID-19 (03 de marzo de 2020).

Figura 16.

Mapa de interpolación de $PM_{2,5}$ y AOD para el 3 de marzo de 2020.



Nota: para el 3 de marzo se ven comportamientos muy similares entre el mapa hecho con AOD y los datos de las estaciones de la Secretaría de Medio Ambiente de Bogotá (García-Delgadillo, 2022).

Los resultados de esta investigación denotan una correlación de 0.60 y 0.62 entre AOD de la NASA y la medición de la red RMCAB del $PM_{2,5}$, incluso la correlación es muy cercana para los datos tomados en el aislamiento y el día normal.

Por otra parte, los resultados de los mapas construidos a partir de AOD y las estaciones en tierra mostraron comportamientos similares. Lo que contrasta el potencial del uso de imágenes satelitales MODIS-MAIAC tienen un potencial para ser usadas como indicadores cualitativos complementarios para la medición de la contaminación del aire en Bogotá.

Asimismo, pueden usarse las imágenes como apoyo para la medición de la contaminación del aire en zonas sin cobertura de la red RMCAB.

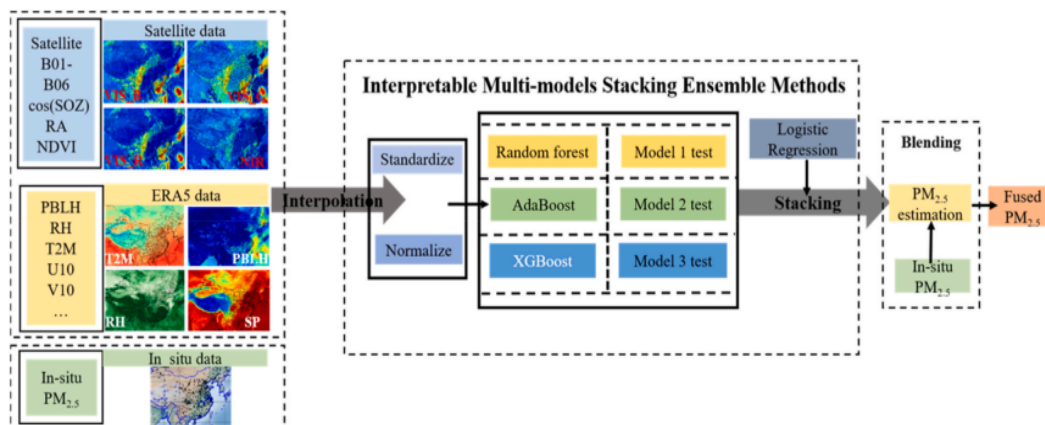
Finalmente, el estudio sugiere realizar más investigaciones con un número mayor de datos para desarrollar modelos predictivos más precisos que puedan estimar la contaminación del aire. Este estudio aporta al desarrollo de esta investigación de tesis

doctoral la importancia de estimar datos obtenidos de fuentes oficiales como la red RMCAB que pueden proveer información confiable para la medición de la calidad del aire.

En el artículo científico realizado por Ma et al. (2024), propone un método de Interpretable Multi-Model Stacking Ensemble Method (IMSEM) para la estimación de las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ en China. El sistema se basa en la combinación de datos del satélite Himawari-8 y las 1691 estaciones terrestres de la red de monitoreo de calidad del aire en China (China Environmental Monitoring Center). Los datos analizados abarcan el periodo de 01 de enero de 2021 hasta el 31 de diciembre de 2022. El método IMSEM propone la combinación de modelos de aprendizaje automático y datos satelitales, realizando una combinación entre ellos para mejorar la precisión en la estimación de la calidad del aire. El modelo se basa en modelos de Random Forest, XGBoost y AdaBoost y una validación cruzada de 10 pliegues.

Figura 17.

Esquema del marco de estudio IMSEM.



Nota: En el esquema IMSEM se muestra la obtención de los datos tanto de las estaciones terrestres como la información satelital y como se aplican los 3 modelos para la determinación de la concentración del $PM_{2.5}$ (Ma et al., 2024).

El desempeño de IMSEM en conjunto superó a los modelos trabajando de forma individual, alcanzando una correlación promedio de los datos de 0.84. Adicionalmente, el método IMSEM se potencia al combinar los tres modelos para aprovechar las fortalezas de cada modelo y así mejorar la estimación de $PM_{2.5}$, asimismo, refuerza el impacto del monitoreo satelital en el cual puede ofrecer soluciones viables para áreas

con escasas observaciones terrestres. Este estudio refleja la importancia y validez del uso de datos satelitales para la medición de la calidad del aire, denotando la importancia de profundizar en la aplicación de diversas técnicas para mejorar la precisión de los datos sobre la calidad del aire.

2.3. Marco Conceptual

El presente marco conceptual define los principales conceptos relacionados con la calidad del aire. Asimismo, las tecnologías IoT y los sistemas de monitoreo ambiental, lo que permitirá tener un mejor entendimiento, comprensión y conexión entre las variables, conceptos y teorías necesarias para abordar el estudio y sustentar el diseño de la metodología integral propuesta.

2.3.1. Calidad del aire

La calidad del aire según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2021) se puede entender como el grado de pureza que puede tener el aire, es decir, la cantidad de agentes contaminantes que contiene. La contaminación del aire puede ocasionar problemas para la salud humana y el medio ambiente. Los principales agentes contaminantes presentes en el aire pueden ser de origen natural o antropogénico. Entre ellos se destacan las partículas en suspensión ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O_3).

Parámetros de interés:

PM_{10} : Partículas en suspensión en el aire sólidas o líquidas con un diámetro menor a $10\mu m$. Estas partículas pueden ser de polvo, cenizas, hollín, cemento, polen o partículas metálicas y la exposición sobre los seres humanos por periodos prolongados puede causar problemas de salud en los pulmones y el corazón.

$PM_{2.5}$: Partículas en suspensión en el aire sólidas o líquidas con un diámetro menor a $2.5\mu m$. Son partículas finas que pueden causar problemas para la salud. Pueden estar formadas por polvo, hollín, metales, sustancias químicas orgánicas, sulfatos y nitratos. Este tipo de partículas normalmente son generadas por motores de combustión, procesos industriales, quemas o incendios, entre otros.

NO₂: El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas contaminante que se forma al quemar combustibles fósiles, es un componente de los óxidos de nitrógeno (NO_x). Este se considera un gas tóxico que puede irritar las vías respiratorias, la nariz y la garganta y los ojos. La exposición prolongada a altos niveles de NO₂ puede causar bronquitis aguda o crónica.

CO₂: El dióxido de carbono (CO₂) es un gas que se produce por la respiración y la combustión de materiales fósiles, en niveles normales no es tóxico, sin embargo, en altas concentraciones puede ser perjudicial para la salud. Los síntomas por exposiciones prolongadas son malestar y fatiga, dolores de cabeza, espasmos musculares, dificultades para la respiración y el funcionamiento del corazón y en casos extremos, puede provocar la pérdida de conciencia y asfixia.

O₃: El ozono troposférico (O₃) es un gas que puede ser dañino para la salud cuando se encuentra en la troposfera. Este gas puede provocar daños para la salud como la irritación de los ojos, nariz y garganta, tos, malestar en las vías respiratorias, deterioro de la función pulmonar, envejecimiento prematuro de los pulmones y daños permanentes en los pulmones.

El índice de calidad del aire (AQI) emitido por la Agencia de protección Ambiental (EPA) para los estados Unidos (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 2024), y para Colombia el (ICA), fue adoptado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (MADS), mediante la resolución 2254 de 2017 (Ministerio de Ambiente, 2017). Este indicador permite evaluar rápidamente los efectos a la salud pública. El monitoreo continuo permite identificar focos de contaminación, permite evaluar los impactos sobre la población y a las autoridades competentes diseñar estrategias de mitigación.

Tabla 1.

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.

CONTAMINANTE	NIVEL MAXIMO PERMISIBLE (ug/m ³)	TIEMPO DE EXPOCISION
PM-10	50	Anual
	75	24 Horas
PM-2.5	25	Anual
	37	24 Horas
SO ₂	50	24 Horas
	100	1 Hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 Hora
O ₃	100	8 Horas
CO	5.000	8 Horas
	35.000	1 Hora

Nota: Niveles máximos permisión de concentración de contaminantes según la resolución 2254 de 2017 para Colombia. (Ministerio de Ambiente, 2017).

Para el desarrollo de la tesis doctoral, la calidad del aire es una de las principales variables de estudio. Las estaciones de monitoreo de Calidad del Aire en Colombia poseen sensores que miden partículas PM₁₀ y PM_{2.5} y otros gases contaminantes suspendidos en el aire, que proveen datos precisos y en tiempo real, lo que permite el fortalecimiento de la capacidad de respuesta de las instituciones públicas y privadas en Colombia.

Tabla 2.

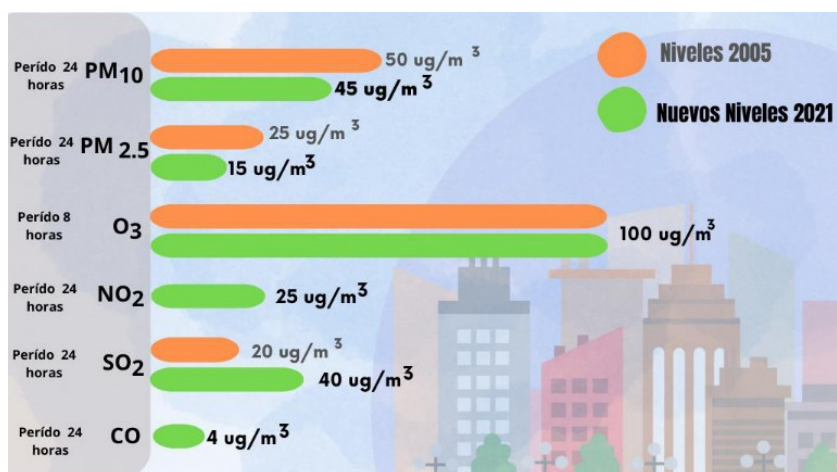
Índice de Calidad del Aire (ICA).

ICA	Calidad del Aire	Proteja su Salud
0 - 50	Buena	No se anticipan impactos a la salud cuando la calidad del aire se encuentra en este intervalo.
51 -100	Moderada	Las personas extraordinariamente sensitivas deben considerar limitación de los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
101-150	Dañina a la Salud de los Grupos Sensitivos	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
151-200	Dañina a la Salud	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar los esfuerzos excesivos prolongados al aire libre; las demás personas, especialmente los niños, deben limitar los esfuerzos físicos excesivos y prolongados al aire libre.
201-300	Muy Dañina a la Salud	Los niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias tales como el asma, deben evitar todos los esfuerzos excesivos al aire libre; las demás personas, especialmente los niños, deben limitar los esfuerzos físicos excesivos al aire libre.
300+	Arriesgado	

Nota: Tabla del índice de Calidad del aire, con escalas para determinar el nivel de calidad del aire. (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 2023).

Figura 18

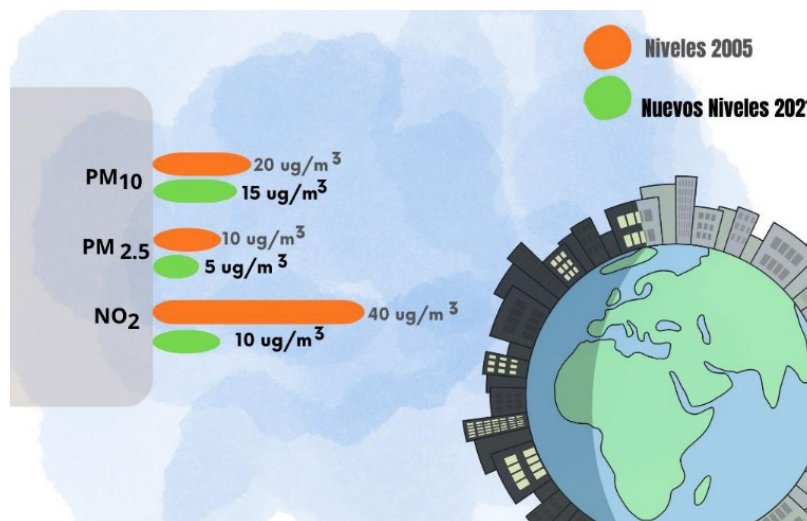
Directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud –OMS sobre la calidad del aire para periodos de exposición cortos.



Nota: Niveles permisibles de concentración de contaminantes en el aire según la OMS para los años 2005 y 2021. (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022).

Figura 19.

Directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud –OMS sobre la calidad del aire para periodos de exposición prolongados.



Nota: Comparación de los niveles permitidos de periodos de exposición prolongados de materiales particulados según la OMS en los años 2005 y 2021. (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022).

2.3.2. Tecnología IoT (Internet de las Cosas)

El Internet de las Cosas (IoT), hace referencia a una red de dispositivos físicos que se interconectan a través de internet, lo que permite la recopilación, intercambio y análisis de los datos en tiempo real (Cartuche Calva et al., 2021). La mayoría de los sistemas IoT se componen de sensores, actuadores, plataformas en la nube y protocolos de comunicación (Lombardi et al., 2021). Este tipo de tecnología las convierte en herramientas ideales para el desarrollo de aplicaciones para el monitoreo ambiental.

Componentes de interés:

Sensores: Dispositivos electrónicos transductores, convierten las señales físicas en eléctricas y de acuerdo con su propósito pueden medir datos ambientales, como concentraciones contaminantes.

Conectividad: Tecnologías emergentes como Wi-Fi, Lora WAN o LTE que permiten la interconexión de hardware para la transmisión de datos.

Procesamiento y análisis: Plataformas o aplicaciones en la nube que permiten la recepción de los datos a través de un protocolo de comunicación, adicionalmente, permiten el almacenamiento y procesamiento de los datos para generar información útil para el usuario final.

Aplicaciones en el monitoreo ambiental: El IoT ha evolucionado a través del tiempo y ahora permite la adquisición de datos ambientales, haciendo posible la implementación de sistemas de bajo costo para la implementación de sistemas eficientes y escalables para la monitorización de la calidad del aire.

En el desarrollo de esta tesis doctoral se propone el análisis de las estaciones que integran las tecnologías IoT o sistemas similares para la transmisión de datos a través de internet para optimizar las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, mejorando su conectividad, sostenibilidad y principalmente la accesibilidad de la información a las instituciones públicas y privadas a la información.

2.3.3. Estaciones de monitoreo ambiental

Las estaciones de monitoreo ambiental son equipos electrónicos diseñados para medir y registrar variables relacionadas con la calidad del aire. Las estaciones de calidad del aire pueden clasificarse en dos tipos principales.

- Estaciones oficiales: Equipos con una precisión muy alta pero costosos y complejos de operar.
- Estaciones de bajo costo: Equipos electrónicos más económicos, basados en sensores de bajo costo adoptando la tecnología IoT, y cuentan con una precisión más baja pero aceptable para ciertos contextos.

Dentro de las estaciones oficiales y acreditadas por el IDEAM, Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), se clasifican según su tecnología, las cuales pueden ser estaciones automáticas, estaciones manuales y estaciones híbridas.

Estaciones automáticas: como su nombre lo indica, son estaciones de monitoreo de la calidad del aire que de manera autónoma después de ser instaladas envían la información a la plataforma para su posterior procesamiento de información.

Estaciones manuales: Las estaciones manuales de calidad del aire, son aquellos dispositivos electrónicos más antiguos que miden y registran la información de los sensores, sin embargo, estos son almacenados en el dispositivo y se hace necesaria la interacción de un operador para recopilar la información.

Estaciones híbridas: las estaciones híbridas, como su nombre lo indican, son estaciones de monitoreo de la calidad del aire que tiene ambas funciones, la opción de enviar la información por algún protocolo de comunicación, o la opción de que un usuario físicamente realice el proceso de extracción de información. En algunos casos las estaciones híbridas, son estaciones manuales que se les hizo un proceso de actualización para proveer la opción del envío de información.

Tabla 3.
SVCA en Colombia, de acuerdo con la tecnología de medición.

Autoridad Ambiental	SVCA según tecnología	No. estaciones automáticas	No. estaciones manuales	No. estaciones híbridas	Total estaciones
AMVA	Híbrido	27	6	3	36
CAM	Manual	-	2	-	2
CAR	Automático	23	-	-	23
CARDER	Automático	-	3	2	5
CDMB	Automático	7	-	-	7
CORANTIOQUIA	Automático	17	-	-	17
CORMACARENA	Automático	2	-	-	2
CORNARE	Híbrido	1	-	4	5
CORPAMAG	Híbrido	3	9	-	12
CORPOBOYACA	Automático	7	-	-	7
CORPOCALDAS	Híbrido	-	6	1	7
CORPOCESAR	Manual	-	16	-	16
CORPOGUAJIRA	Manual	-	9	-	9
CORPONOR	Manual	-	3	-	3
CORTOLIMA	Manual	-	2	-	2
CRC	Automático	1	-	-	1
CRQ	Manual	-	2	-	2
CVC	Automático	7	-	-	7
CVS	Híbrido	-	-	4	4
DAGMA	Automático	9	-	-	9
EPA BARRANQUILLA	Automático	3	-	-	3
SDA	Automático	20	0	0	20

Nota: listado de estaciones de medición de calidad del aire en Colombia acreditadas por el IDEAM en el año 2021. (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022).

En términos generales, las estaciones de medición de calidad del aire en Colombia deben estar acreditadas por el IDEAM, entidad encargada de regular e informar el estado de la calidad del aire en Colombia, sin embargo, existen estaciones de medición indicativas, las cuales son estaciones que presentan una representatividad temporal inferior al 75% y reportaron al menos 18 datos diarios. Por otra parte, uno de los grandes retos que tienen las organizaciones para tener en operación las estaciones es el presupuesto para mantenimiento y operación de las estaciones, esta situación hace que algunas estaciones pierdan su representatividad en la medición por su salida de operación a través del tiempo.

2.3.4. Metodología integral.

Una metodología integral implica la elaboración de un conjunto estructurado de procedimientos y protocolos que aborden de manera holística los desafíos de un sistema o problema (Laino & Iglesias, 2024). En el contexto de esta investigación, se refiere a los pasos necesarios para implementar, gestionar y optimizar estaciones de monitoreo IoT.

Componentes de una metodología integral:

- Protocolos para instalación y calibración de sensores.
- Procedimientos para el mantenimiento operativo.
- Estrategias para la gestión y análisis de datos.

El objetivo general de la tesis consiste en diseñar una metodología integral que permita el uso eficiente de estaciones de medición de calidad del aire que implementen tecnologías IoT, mejorando la calidad de los datos, la sostenibilidad operativa de las estaciones, la estandarización de proceso de recolección de información y finalmente, la capacidad de respuesta ante los desafíos ambientales.

2.4. Marco Contextual

El contexto permite situar esta investigación entre los debates actuales, resaltando la experticia y los avances en la creación y aplicación de sistemas con IoT para refinar evaluaciones ambientales. El análisis, enfocado en infraestructuras del sistema colombiano, incluye una evaluación de las influencias tecnológicas, institucionales y sociales del período 2023-2025, priorizando la comprensión de sus necesidades y desafíos.

A nivel mundial, naciones como China e India han establecido eficazmente sistemas de vigilancia ambiental impulsados por IoT, mejorando notablemente la difusión y precisión de la información. Por otra parte, en Colombia, existen sistemas de monitoreo, como los del IDEAM y empresas locales, con alcance espacial y mejoras tecnológicas limitadas; la implementación de tecnologías IoT puede replicar estos avances internacionales, adaptándose al contexto local.

La política ambiental colombiana, gestionada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, define estándares de calidad del aire basados en la Resolución

2254 de 2017 (Ministerio de Ambiente, 2017). Sin embargo, estas organizaciones enfrentan limitaciones por el alto costo de las estaciones convencionales y la falta de mecanismos para adoptar nuevas tecnologías como el Internet de las Cosas.

La implementación del IoT en la evaluación de la calidad del aire en Colombia enfrenta desafíos como la disponibilidad de red en zonas rurales y la calibración precisa de sensores de bajo costo. No obstante, estas innovaciones ofrecen ventajas significativas como la recolección instantánea de información y la capacidad de la obtención de la información en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y la participación ciudadana.

La calidad del aire en Colombia afecta directamente el bienestar público, contribuyendo al aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Dispositivos IoT asequibles mejoran notablemente la velocidad de respuesta ante situaciones de contaminación grave, apoyando los objetivos de salud global (ODS 3) y mitigación climática (ODS 13).

El análisis contextual de esta investigación subraya la necesidad de adoptar estrategias innovadoras para abordar los problemas de monitoreo atmosférico en Colombia. Considerando ejemplos internacionales, recursos nacionales y necesidades regionales, busca diseñar una estrategia que mejore las configuraciones del IoT de bajo costo y fortalezca la gestión ambiental a nivel nacional.

2.5. Marco Legal y Normativo

2.5.1. Normatividad y Acuerdos Internacionales

El contexto histórico sobre la normatividad de la calidad del aire tiene sus orígenes en Estados Unidos, en el año de 1963 se promulgó la Ley Federal de Aire Limpio para controlar la contaminación del aire. Esta ley ha tenido diferentes enmiendas a través del tiempo, sin embargo, no fue hasta el año de 1970 en donde el Congreso aprobó la Ley de aire Limpio y creó la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Esta ley con la ayuda de la Agencia de Protección Ambiental tiene la autoridad para limitar las emisiones contaminantes de fuentes como fábricas, plantas y servicios públicos,

asimismo, la ley endureció las regulaciones en 1977 y realizó nuevas modificaciones en 1990 (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), 2007).

El convenio de Estocolmo es un tratado internacional compuesto por 185 países más la unión europea, este es un tratado internacional fue suscrito en Estocolmo, Suecia en el año 2001 y entró en vigor en el año 2004. El convenio tiene como finalidad la protección de la salud humana y el medio ambiente de los contaminantes orgánicos persistentes (COP), dentro de sus principales objetivos se enmarcan la prohibición y reducción de la producción, uso, importación, exportación y emisión de COP; promover el uso de tecnologías y prácticas limpias que sustituyan a los COP y tratar y eliminar de forma segura los COP. (STOCKHOLM CONVENTION, 2023).

Otro convenio importante para mencionar sobre el manejo de residuos peligrosos es el convenio de Basilea, el cual es un tratado internacional que busca la reducción de la generación y el movimiento de desechos peligrosos, este convenio se negoció a finales de los años 80 y entró en vigor en 1992. Este fue aceptado por 116 países en primera instancia, adicionando a Colombia mediante la ley 253 de 1996, en la actualidad el convenio de Basilea está compuesto por 188 países. Los principales acuerdos establecidos dentro del marco de este acuerdo se encuentran la reducción de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos, por otra parte, obliga a los países miembros a eliminar los desechos de manera racional y prohíbe la exportación de desechos peligrosos a zonas específicas (PNUMA, 2014). Por otra parte, la autoridad encargada de hacer seguimiento a este acuerdo en Colombia es la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), evaluando y realizando el seguimiento a las solicitudes de autorización para mover desechos peligrosos y hacer los pronunciamientos sobre las solicitudes de importación y tránsito de desechos peligrosos (DAFP, 2011).

Adicionalmente, el acuerdo de París, adoptado en la 21ª conferencia (COP21) de las partes de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) en el año 2015. Este acuerdo se considera histórico debido a que es el primer acuerdo vinculante que hace que todos los países se unan para combatir el cambio climático. En él se relacionan compromisos y objetivos sólidos para su consecución con una fecha límite para el año 2030. Dentro de los principales objetivos relacionados en este acuerdo histórico se contempla el limitar el calentamiento global en

1,5 - 2°C por encima de los niveles preindustriales, promover la transición a una economía baja en emisiones, alcanzar el máximo de emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible y lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo (Naciones Unidas, 2015). Colombia hizo parte de la conferencia y realizó compromisos sobre la reducción de las emisiones de gases efecto de invernadero en un 20% para el 2030, asimismo abordar el cambio climático de manera equitativa.

En este sentido, se hace necesario tener en cuenta las directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la calidad del aire. La OMS fundada en 1948 es un organismo de las Naciones Unidas que se encarga de la salud Global y se fundamenta bajo la premisa de que todas las personas tengan el mayor nivel de salud posible (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2023). Las directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire han tenido dos revisiones importantes en los años 2005 y 2021. En la revisión del año 2005, se establecieron los niveles de emisión anual promedio para PM_{2.5} y PM₁₀, Adicionalmente, se establecieron los niveles de emisión para otros contaminantes como el ozono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2006). Asimismo, para la revisión del año 2021, se redujeron los niveles de emisión promedio anual para PM_{2.5} y PM₁₀, se establecieron metas intermedias para la reducción de concentraciones contaminantes y se revisaron los niveles de emisión para otros contaminantes como el ozono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el monóxido de carbón (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021b).

2.5.2. Normatividad Colombiana.

En cuanto se refiere a la normatividad colombiana y el marco normativo sobre todo lo relacionado con el medio ambiente, se tiene como origen la Ley 99 de 1993 por el cual se crea el ministerio de Ambiente y Organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Esta ley también es conocida como la Ley General Ambiental de Colombia, puesto que en ella se define el marco legal ambiental del país. Entre sus principales disposiciones se encuentran: La creación del Ministerio de Ambiente, La reorganización del sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente, la definición de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) como las máximas

autoridades ambientales en Colombia, La definición de los principios de la política ambiental colombiana, la regulación de las condiciones para el saneamiento del medio ambiente y la definición de la licencia ambiental. Finalmente, esta ley establece el uso sostenible de los recursos naturales como un derecho y deber de los ciudadanos (DAFP, 1993).

En el año 2010, El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), emitió la resolución 610 por el cual se establecen los estándares nacionales de calidad del aire en Colombia, asimismo, se indican los niveles máximos permitidos de contaminantes de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM_{10} , $PM_{2.5}$, Ozono (O_3), Dióxido de Azufre (SO_2), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Monóxido de Carbono (CO), asimismo, los procedimientos de medición de la calidad del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia. Finalmente, establece los procedimientos para que las autoridades ambientales realicen mediciones de la calidad del aire. (MAVDT, 2010)

De igual forma, en Colombia, está vigente la Resolución 2254 de 2017 en la cual se establece los límites permisibles para contaminantes atmosféricos, esta resolución ha tomado como base las directrices de la OMS (Ministerio de Ambiente, 2017), sin embargo, los niveles adoptados en esta resolución están en algunos parámetros distantes a los establecidos por la OMS, asimismo, algunos estudios realizados en algunas ciudades colombianas como el de López-Restrepo et al. (2020) y Mangones et al. (2020) denotan que muchas de ellas superan los límites permitidos por la resolución, denotando la necesidad de adoptar y generar estrategias efectivas para el monitoreo y control.

Posteriormente, en el año 2019 se decretó la Ley 1972, en el cual se establecen las medidas para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos que circulan en el país con énfasis en el material particulado, con el fin de resguardar la vida, la salud y goce de un ambiente sano. En ella se estableció que, a partir del 01 de enero de 2023, se distribuirá el diésel con menos de 15 ppm, asimismo, se establece que, a partir del 01 de diciembre de 2025, el diésel distribuido en Colombia tendrá 10ppm. Finalmente, esta ley también establece la necesidad de crear un marco normativo para reglamentar las tecnologías vehiculares de bajas emisiones. (Congreso de la República, 2019).

3. Capítulo III. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación

El presente capítulo expone los fundamentos metodológicos que sustentan esta investigación, realizando un principal énfasis en el enfoque, diseño y procedimientos utilizados en la recolección, análisis y presentación de los datos.

Como primera medida, se inicia con la operacionalización de las variables y la matriz de consistencia científica y metodológica, en este apartado se refuerza la coherencia entre los objetivos de la investigación, las variables de estudio y los métodos empleados.

Posteriormente, se realiza la definición del enfoque de investigación, así como el tipo de estudio y los métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos, asegurando una ruta adecuada para la recopilación de la información.

También se determina la muestra y sus criterios de selección, lo que permite garantizar que los datos recolectados tengan una buena representatividad.

A continuación, se realiza la descripción del trabajo de campo y la aplicación de los instrumentos, seguido del procesamiento y análisis de la información, donde se examinan los datos obtenidos. Finalmente, se presentan los resultados y discusión, permitiendo que estos hallazgos sean contrastados con el marco teórico y los objetivos de la investigación, lo que permite consolidar la validez de la propuesta metodológica.

3.1. Cuadro Operacionalización de variables.

Tabla 4.*Operacionalización de Variables.*

Operacionalización de Variables						
Tema: Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas durante el periodo 2023 – 2025						
Pregunta de investigación	Objetivo general	Objetivos específicos	Hipótesis	Variables estudiadas	Dimensiones	Indicadores
¿Cómo se puede contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de	Diseñar una metodología integral para el uso eficiente de estaciones de monitoreo de variables	Sistematizar los fundamentos teóricos relacionados con la calidad del aire y sus principales	La integración y adopción de tecnologías IoT en las estaciones de monitoreo de variables ambientales y de calidad del aire	Variable independiente: Tecnología IoT	Implementación tecnológica.	Número y tipo de sensores integrados en las estaciones de monitoreo.
					Configuración y conectividad de estaciones de monitoreo.	Porcentaje de estaciones con conectividad activa y operativa.

<p>bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas?</p>	<p>ambientales, basada en la integración de tecnología IoT, para mejorar su sostenibilidad, precisión de datos y gestión operativa en instituciones públicas y privadas, mediante un enfoque deductivo analizando datos base del periodo 2023-2025.</p>	<p>contaminantes, el impacto en la salud pública y en el ambiente, la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo ambiental, con el fin de establecer las bases conceptuales y referenciales que sustenten la propuesta metodológica de esta investigación.</p>	<p>en Colombia, permitirá una mejor gestión en las instituciones públicas y privadas de la información sobre la calidad del aire, asimismo, proveerá una eficiencia operativa y sostenible de las estaciones de medición. Fortaleciendo la capacidad de las respuestas de las instituciones ante los desafíos</p>		<p>Protocolos de calibración y mantenimiento</p>	<p>Frecuencia de calibración y mantenimiento según protocolos establecidos.</p>
--	---	--	---	--	--	---

		<p>Analizar el estado actual de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas, identificando sus limitaciones y oportunidades, con énfasis en la implementación de la tecnología IoT para la optimización</p>	<p>ambientales y de salud pública que enfrentan actualmente los ciudadanos del territorio colombiano. Esto podría ser validado mediante el análisis de los datos cuantitativos disponibles de los portales en línea de datos abiertos en Colombia sobre la calidad del aire, y el análisis cualitativo de los protocolos y</p>			
--	--	--	--	--	--	--

		de su eficiencia, conectividad y sostenibilidad operativa.	procedimientos propuestos para la gestión de las estaciones.			
--	--	--	--	--	--	--

		<p>Explicar los datos históricos disponibles en las bases de datos abiertos y de las fuentes oficiales sobre variables ambientales (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO₂) en Colombia, determinando patrones y tendencias que respalden la importancia</p>				
--	--	---	--	--	--	--

		del monitoreo continuo.		Variable dependiente: Eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire	Precisión y sostenibilidad operativa.	Nivel de precisión de los datos recolectados frente a estándares internacionales.
					Accesibilidad y utilidad de los datos generados.	Reducción en el tiempo de respuesta ante emergencias relacionadas con calidad del aire.

		<p>Formular una propuesta metodológica de protocolos y procedimientos para la optimización de la gestión operativa y el mantenimiento de estaciones de monitoreo IoT de bajo costo en instituciones públicas y privadas colombianas.</p>			<p>Impacto en la toma de decisiones ambientales y de salud pública.</p>	<p>Número de políticas públicas y decisiones estratégicas basadas en los datos generados.</p>
--	--	--	--	--	---	---

Nota: Cuadro de operacionalización de variables de la tesis Doctoral. Fuente: el autor.

3.2. Diseño metodológico.

3.2.1. Definición del enfoque, diseño y tipo de investigación de la tesis.

3.2.1.1. Enfoque de investigación

El enfoque de investigación adoptado para el desarrollo de esta tesis es de tipo mixto. A continuación, se presentan definiciones de este enfoque según distintos autores:

Los métodos mixtos representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como la integración y discusión conjunta para realizar inferencias producto de toda la información recolectada, logrando así, una mayor comprensión del fenómeno de estudio. (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 612).

Los métodos mixtos se basan en varios fundamentos filosóficos que respaldan su enfoque integrador y su capacidad para abordar la complejidad de la realidad. El pragmatismo, el positivismo, el constructivismo y el realismo crítico proporcionan las bases teóricas para la utilización de los métodos mixtos en la investigación. Al combinar enfoques cualitativos y cuantitativos, estos métodos ofrecen la posibilidad de obtener una comprensión más completa y holística de los fenómenos estudiados, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informada y la generación de conocimiento significativo. (Cueva Luza et al., 2023, p. 79).

Este enfoque da respuesta a la necesidad de comprender, desde un análisis integral, el impacto de tecnologías emergentes como el IoT en el monitoreo de la calidad del aire, asimismo, la efectividad de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de bajo costo en instituciones públicas y privadas en el territorio colombiano.

Desde el punto de vista cuantitativo, se realizará un análisis de variables ambientales como PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO₂. Estas variables son necesarias para la determinación de la calidad del aire. Adicionalmente, la información será recolectada principalmente de bases de datos abiertas y de fuentes oficiales, como los que se pueden consultar en el IDEAM por parte de estaciones de calidad del aire en Colombia, y la red aqicn.org que proporciona la información de estaciones IoT de bajo costo. Este análisis permitirá la realización de análisis de datos para la

identificación de patrones y tendencias, garantizando un estudio empírico riguroso que se fundamenta en la medición y comparación de variables e indicadores relevantes.

En cuanto al enfoque cualitativo el trabajo se fundamenta en el impacto y análisis de la calidad del aire en contextos socioambientales, Adicionalmente, en el diseño de protocolos y procedimientos que den respuesta a las necesidades de operatividad de las estaciones de monitoreo y que pueda ayudar a su sostenibilidad a través del tiempo. Por otra parte, se incluirá la percepción de las instituciones educativas y gubernamentales en cuanto a ellas como perciben la calidad del aire y cuáles serían las dificultades y oportunidades que se puedan llegar a afrontar.

La adopción del enfoque mixto en este tipo de investigaciones permite una comprensión integral del estudio que se está abordando en este trabajo. Adicionalmente, permite abordar el problema desde dos aristas diferenciadas, lo que ayuda a abordar el problema de investigación desde múltiples miradas en aras de potencializar los hallazgos basados en la validez y aplicabilidad de cada enfoque. Según Creswell & Creswell (2018), la combinación de los métodos cuantitativos y cualitativos "proporciona una visión más completa del problema de investigación, al integrar datos numéricos con narrativas y contextos sociales".

3.2.1.2. Diseño de la investigación.

Siguiendo con la naturaleza aplicada con enfoque de investigación mixta realizada en este trabajo de tesis doctoral, el diseño seleccionado es el exploratorio secuencial, el cual permite la recopilación de los datos cualitativos y cuantitativos en diversas fases, de manera estructurada y progresiva.

De acuerdo con Hernández Sampieri & Mendoza Torres, p. (2018, p. 631) El diseño exploratorio secuencial (DEXPLOS) implica una fase inicial de recolección y análisis de datos cualitativos seguida de otra donde se recaban y analizan datos cuantitativos. Existen dos modalidades de diseño que se enmarcan de acuerdo con la finalidad: Derivativa y Comparativa. Para el caso del diseño que se abordó en esta tesis doctoral se seleccionó la modalidad derivativa, la cual se establece la recolección y el análisis de los datos cuantitativos se debe realizar sobre la base de los resultados cualitativos y la mezcla mixta ocurre cuando se conecta el análisis cualitativo de los datos y la recolección de datos cuantitativos. Asimismo, el DEXPLOS es utilizado cuando el investigador necesita desarrollar un instrumento estandarizado porque las

herramientas existentes son inadecuadas o no se puede disponer de ellas. Para ello se propone un diseño experimental de tres etapas:

- a. Recabar datos cualitativos y analizarlos.
- b. Utilizar los resultados para construir un instrumento cuantitativo
- c. Administrar el instrumento a una muestra probabilística de una población para validarlo

El diseño exploratorio secuencial es el adecuado para esta tesis, inicialmente se requiere de un análisis cualitativo exploratorio, en el que se surge la necesidad de recopilar la información sobre el estado actual de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, incluyendo el modo de operación, alcances y deficiencias que puedan tener y asimismo las oportunidades de mejora que se puedan identificar. Posteriormente, la información obtenida en esta primera fase servirá como base para el diseño de la fase cuantitativa. En donde se podrá verificar si existen tendencias y/o patrones con los datos objetivos de la calidad del aire y el comportamiento del funcionamiento de las estaciones.

La aplicación de este enfoque secuencial permite una mejor comprensión del fenómeno de estudio, al existir una combinación de la exploración inicial de la información y la percepción de la validación empírica mediante los datos cuantitativos.

De acuerdo con el diseño exploratorio secuencial y la modalidad derivativa. A continuación, se presentan las fases implementadas en esta tesis doctoral:

Fase cualitativa exploratoria: Revisión documental de normativas ambientales y estándares tecnológicos para el monitoreo de calidad del aire. Asimismo, la observación de estaciones de monitoreo en instituciones públicas y privadas y el análisis de los factores críticos en la implementación y sostenibilidad de las estaciones basadas en tecnología IoT.

Fase cuantitativa descriptiva: Recolección de datos históricos sobre calidad del aire (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO₂) provenientes de estaciones de calidad del aire de fuentes oficiales (IDEAM, RMCAB). Entrevistas a operadores de estaciones de calidad del aire o aplicaciones similares, y finalmente, realizar el análisis estadístico de las tendencias y patrones en la calidad del aire.

Fase de integración de resultados: Análisis comparativo entre los hallazgos cualitativos y cuantitativos. Asimismo, la identificación de las relaciones entre los datos obtenidos y las problemáticas detectadas en la fase exploratoria que permita el desarrollo de una metodología

integral para la optimización del uso de estaciones IoT en el monitoreo de la calidad del aire en Colombia.

3.2.1.3. Tipo de Investigación.

El tipo de investigación que se abordará en esta investigación se clasifica dentro de la categoría propositiva-aplicada.

De acuerdo con esta denominación se trabajan los dos conceptos por separado para tener un mejor entendimiento del tipo de investigación. Los siguientes autores definen estos tipos de investigación como:

La investigación aplicada se emprende para determinar los posibles usos de los resultados de la investigación básica, o para determinar nuevos métodos o formas de alcanzar objetivos específicos predeterminados. Este tipo de investigación implica la consideración de todo el conocimiento existente y su profundización, en un intento de solucionar problemas específicos. (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015, p. 54)

La investigación propositiva es conocida también como de proyectos factibles, constituye un proceso de investigación donde la hipótesis es sustituida por una propuesta de solución al problema planteado y representa la estrategia que, a nuestro entender, se utiliza cuando se propone una nueva Ley, una nueva institución, nuevos procesos en el campo del derecho. (Nava de Villalobos, 2002, p. 13)

De acuerdo con los conceptos expuestos anteriormente. El presente trabajo busca desarrollar una metodología integral que ayude a la introducción de soluciones prácticas y que sean escalables para el monitoreo de la calidad del aire mediante la adopción de tecnologías IoT. Por tal motivo, este enfoque tiene como objetivo la generación de conocimiento teórico, al mismo tiempo que contribuye al desarrollo de la formulación de políticas públicas y directrices institucionales.

Desde la perspectiva del tipo de investigación propositiva adoptada en este trabajo, permitirá la orientación hacia el diseño y propuesta de una metodología integral que ayude a la optimización del uso de estaciones de monitoreo ambiental, debido a lo que se tendrá en cuenta aspectos como la calibración, mantenimiento y el análisis de los datos.

En relación con el tipo de investigación aplicada enfocada a los resultados, estos se enfocarán a la implementación en instituciones públicas y privadas de Colombia, en

concordancia con el impacto directo en la sostenibilidad operativa de los sistemas de monitoreo y en la toma de decisiones ambientales fundamentadas en su evidencia.

Hernández-Sampieri & Mendoza (2020) destacan que el diseño exploratorio-descriptivo es adecuado para investigaciones que combinan la innovación tecnológica con problemáticas de interés social, ya que permite explorar fenómenos nuevos y describirlos de forma detallada para generar soluciones específicas.

3.2.2. Definición de métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos.

La presente tesis doctoral, al tener un enfoque de investigación mixta y de tipo propositiva-aplicada, tiene la necesidad inherente de adoptar dos tipos de miradas para la integración de los métodos y las técnicas, que permitan obtener los datos desde el enfoque cuantitativo y asimismo los datos cualitativos, los cuales permiten tener una alineación directa con los objetivos de la investigación y a su vez ayude a responder a la pregunta de investigación planteada.

3.2.2.1. Métodos para la obtención de los datos.

En esta investigación, la recolección de datos se estructura a partir de dos niveles de obtención del conocimiento científico: el nivel teórico y el nivel empírico. Ambos permiten desarrollar los objetivos de la investigación de manera integral, garantizando una base sólida para la formulación de la metodología propuesta.

3.2.2.2. Métodos de Obtención del Conocimiento Teórico.

Los métodos teóricos permiten la construcción de la base conceptual y la formulación de nuevos conocimientos a partir del análisis de la información existente. A partir de los métodos investigados en la siguiente tabla se mencionan y aplican al desarrollo de esta tesis doctoral:

Tabla 5.
Métodos aplicados para la obtención del conocimiento teórico.

Método	Concepto	Aplicación
Histórico-lógico	Se aplica para estudiar una parte de la trayectoria histórica del objeto de investigación asociada al problema	Permite analizar la evolución de las estaciones de monitoreo de calidad del

	<p>científico declarado, para determinar la tendencia, las etapas más significativas de su desarrollo y sus conexiones históricas fundamentales de forma cronológica y lógica (Torres-Miranda & Torres-Miranda, 2020, p. 9).</p>	<p>aire en Colombia y su relación con la implementación de tecnologías IoT. Adicionalmente, permite indagar las normativas, tanto científicas como tecnológicas en el monitoreo de variables ambientales.</p>
<p>Analítico-sintético</p>	<p>Se refiere a dos procesos intelectuales inmersos que operan en unidad: el análisis y la síntesis. El análisis es un procedimiento lógico que posibilita descomponer mentalmente un todo en sus partes y cualidades, en sus múltiples relaciones, propiedades y componentes. Permite estudiar el comportamiento de cada parte. La síntesis es la operación inversa, que establece mentalmente la unión o combinación de las partes previamente analizadas y posibilita descubrir relaciones y características generales entre los elementos de la realidad. (Rodríguez Jiménez & Pérez Jacinto, 2017, pp. 8–9).</p>	<p>Permite la descomposición de la información sobre IoT y monitoreo ambiental en sus componentes esenciales y luego facilita su integración en una visión holística. Adicionalmente, se aplicará en la revisión documental de normativas, estudios previos y bases de datos de calidad del aire.</p>
<p>Hipotético-deductivo</p>	<p>Las hipótesis son puntos de partida para nuevas deducciones. Se parte de una hipótesis inferida de principios o leyes o</p>	<p>Gestiona la formulación y validación de hipótesis relacionadas con la</p>

	sugerida por los datos empíricos, y aplicando las reglas de la deducción, se asimila a predicciones que se someten a verificación empírica, y si hay correspondencia con los hechos, se comprueba la veracidad o no de la hipótesis de partida. (Rodríguez Jiménez & Pérez Jacinto, 2017, p. 12).	efectividad de las estaciones de calidad del aire y monitoreo ambiental. Además, permite establecer inferencias sobre la viabilidad de la metodología propuesta en función de los hallazgos empíricos.
Modelación	El proceso de modelación comienza con la obtención de una abstracción de la realidad (modelo) que se materializa, se trabaja con esta materialización y se obtiene un nuevo conocimiento que se aplica a la explicación de la realidad de la cual se partió. (Valle Lima, 2007, p. 6).	Se utilizará para el diseño de la metodología integral de gestión de estaciones IoT, considerando variables como precisión de datos, sostenibilidad operativa y accesibilidad.

Nota: En la tabla se listan los métodos para la obtención del conocimiento teórico adoptados en la tesis doctoral. Fuente: el autor.

3.2.2.3. Técnicas de obtención de los datos.

Las técnicas para la obtención de datos empíricos permiten obtener información directamente de la realidad. A continuación, se presentan las diferentes técnicas que se aplicaran para la obtención de los datos:

Análisis documental: de acuerdo con Marcelino Aranda et al., p. (2024, p. 1) el análisis documental es un proceso de acceso a la información disponible para construir el conocimiento. A través de éste, el investigador comprende y analiza las definiciones y conceptos alrededor de un tema de investigación. En este sentido, la forma de realizar este análisis depende de los insumos disponibles y de la experiencia y habilidades del propio investigador. Asimismo, Martínez-Corona et al. (2023) indica que cuando el proceso de localizar, procesar y almacenar información de documentos tiene la función de responder preguntas sobre un tema en específico se le denomina análisis documental, amplía el proceso en organizar y analizar los materiales para lograr encontrar esas respuestas. En ese sentido, para realizar el análisis de la documentación, se

realizará la revisión del informe sobre las Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire publicado en el 2021. (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021a), lo anterior relacionado con las recomendaciones internacionales, por otro lado, se analizará la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por parte de la normatividad colombiana (Ministerio de Ambiente, 2017). El análisis de estos referentes permitirá consolidar una base teórica y normativa para la propuesta de la metodología integral propuesta en esta tesis doctoral.

Recolección de datos históricos: se realizará la indagación de datos históricos sobre la calidad del aire, tanto de fuentes acreditadas como el IDEAM e información de datos abiertos en Colombia, también, se extraerán datos de las fuentes de datos proporcionadas por la red aqicn.org, lo que garantizará una base sólida de los datos, asimismo, la interpolación de la información permitirá establecer el alcance y cobertura de ambos métodos de obtención de información.

Entrevistas semiestructuradas: se define como una conversación que se propone un fin determinado distinto al simple hecho de conversar (Laura et al., 2013, p. 163). En el último caso la entrevista puede ser realizada a una pareja o grupo pequeño como una familia o un grupo de trabajo de un área determinada (Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018, p. 449). La entrevista semiestructurada que se realizó con antelación con un pliego de preguntas. Para este estudio, se entrevistará a dos expertos, al Magister Juan Alejandro Chica García, Ingeniero Electrónico y Magister en Ingeniería con énfasis en energías, quien ha desarrollado investigaciones, proyectos y publicaciones en el área de la calidad del aire, asimismo, se entrevistará al Ingeniero Físico Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera quien es PhD en Sistemas Mecatrónicos. Este grupo de expertos ayudará a evaluar la encuesta estructurada que se aplicará en esta tesis doctoral.

Técnicas de observación directa: La implementación de la observación directa en escenarios reales de medición de calidad del aire en instituciones disponibles a nivel local, permitirá la evaluación de las condiciones actuales, técnicas, métodos adoptados actualmente en la operación de las estaciones de medición. Esta observación permitirá realizar una identificación de los alcances y limitaciones operativas.

Encuestas estructuradas: de acuerdo con Hernández Sampieri et al., p. (2014, p. 217) Los cuestionarios se utilizan en encuestas de todo tipo, y es tal vez el instrumento más usado para

recolectar datos, el cuestionario consiste en un conjunto de preguntas respecto de una o más variables a medir y estas deben ser congruentes con el planteamiento del problema. Asimismo, como lo indica Hernández Sampieri & Mendoza Torres, p. (2018, p. 250) Los cuestionarios son un ejemplo de los instrumentos de medición de los cuales dispone el enfoque cuantitativo. En ese sentido, se realizarán encuestas dirigidas a la población inmersa dentro de las instituciones públicas y privadas interesadas en la calidad del aire en su entorno, y también a usuarios finales de aplicaciones y estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Estas encuestas podrán arrojar resultados sobre la percepción de los usuarios sobre la utilidad y accesibilidad a la información de las tecnologías IoT implementadas en el monitoreo ambiental.

3.2.2.4. Instrumentos de obtención de los datos.

Guía de revisión documental: Se realizará un instrumento estructurado que permita realizar una identificación y análisis de la normatividad vigente, investigaciones previas realizadas y las bases de datos históricas relacionadas con la calidad del aire. Disponible en el Anexo A.

Encuestas en línea: Se desarrollará un cuestionario en línea con preguntas cerradas y escala tipo Likert para la comunidad de las instituciones tanto públicas como privadas interesadas en el monitoreo de la calidad del aire, lo que permitirá conocer la percepción de los sistemas actuales de recolección y divulgación de la información. Disponible en el Anexo A.

Registros de observaciones: Para la realización del registro de observaciones, será necesario la construcción de un formato estandarizado que permita documentar las condiciones de operación, calibración y mantenimiento de las estaciones de monitoreo de calidad del aire durante las visitas a los equipos disponibles a nivel local. Disponible en el Anexo A.

Software para análisis de datos: Para el análisis de los datos tanto cuantitativos como cualitativos, se emplearán software como Excel, herramientas en línea como g-suite de Google, para el procesamiento de la información y realizar los análisis correspondientes de la información. Disponible en el Anexo B.

3.2.3. Determinación de la muestra y su criterio de selección.

3.2.3.1. Población de estudio

Para determinar la población de estudio de esta investigación, es necesario tener en cuenta que se divide principalmente en dos grupos: las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia y los actores en la gestión y uso de estaciones IoT.

3.2.3.2. Estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia

Las estaciones implementadas para el monitoreo de la calidad del aire en Colombia incluyen aquellas acreditadas por el Ministerio del Medio Ambiente a través del IDEAM, así como las estaciones de bajo costo implementadas por instituciones públicas y privadas. Por otra parte, para que exista una correlación entre los datos accesibles de cualquier tipo de estación, se considerarán aquellas que reporten variables semejantes como PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 y CO_2 . Finalmente, se incluirá la información de fuentes de datos oficiales del IDEAM, RMCAB y redes de monitoreo locales.

3.2.3.3. Actores en la gestión y uso de estaciones IoT

Los actores de la gestión y uso de las estaciones IoT estarán conformados, en primer lugar, por expertos en calidad del aire y tecnologías IoT; asimismo, se incluirán diseñadores y/o técnicos responsables de la operación de las estaciones de monitoreo en instituciones tanto públicas como privadas. Adicionalmente, es necesario incluir a investigadores y/o académicos que han desarrollado investigaciones y trabajos sobre las tecnologías IoT y su aplicación en la medición de variables. Finalmente, se incluirá a la población de las instituciones públicas y privadas interesadas en la gestión ambiental y la calidad del aire.

3.2.3.4. Unidad de análisis y unidad de muestreo

Unidad de análisis: Se estudiarán datos históricos de calidad del aire que se encuentran en las bases de datos abiertas de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia, destacando las particularidades de las estaciones de bajo costo que emplean tecnología IoT. Asimismo, se incorporarán en el estudio las opiniones de actores relevantes, como los

especialistas y el grupo de la población vinculada al seguimiento de la calidad del aire en Colombia.

Unidad de muestreo:

- Para el análisis de estaciones: Se seleccionarán estaciones representativas de bajo costo y acreditadas que tengan datos comparables.
- Para el análisis cualitativo: Se incluirán entrevistas con expertos y gestores ambientales que aporten información relevante.
- Para el análisis cuantitativo: Se aplicarán encuestas a la comunidad interesada en la calidad del aire.

3.2.3.5. Tipo de muestreo

Dado que la investigación tiene un carácter propositivo-aplicado y combina métodos cuantitativos y cualitativos, se emplean dos tipos de muestreo:

Según Hernández Sampieri et al., pp. (2014, pp. 170–191), las muestras se dividen en dos categorías principales: probabilísticas y no probabilísticas. En las muestras probabilísticas, todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de ser seleccionados, lo que permite generalizar los resultados a toda la población. Por otro lado, en las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador.

Muestreo no probabilístico por conveniencia y disponibilidad (para estaciones y entrevistas).

Muestreo probabilístico aleatorio simple (para encuestas a la comunidad interesada en la calidad del aire).

Muestreo por conveniencia: es necesario aplicar este tipo de muestreo, debido a que el número de expertos y/o técnicos disponibles en el área del monitoreo de la calidad del aire y el uso de las tecnologías IoT es muy reducido, asimismo, se incluirán actores de diversos sectores como el académico, gubernamental y privado para obtener diversas perspectivas.

Muestreo por disponibilidad de los datos: este tipo de muestreo es similar al del muestreo por conveniencia, lo anterior teniendo en cuenta que solo se podrán incluir estaciones a las cuales se pueda acceder a su información (datos abiertos) que posean registros históricos accesibles y

comparables, asimismo, se priorizará los datos de fuentes oficiales disponibles como el IDEAM, RMCAB y redes de monitoreo regionales.

Muestreo probabilístico aleatorio simple: Para garantizar una muestra representativa en las encuestas, se aplicó una fórmula estadística para determinar el tamaño mínimo requerido con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%.

3.2.3.6. Criterios de selección de la muestra

Referente a las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

- Que operen en instituciones públicas o privadas en Colombia.
- Que cuenten con datos históricos de al menos dos años.
- Que reporten información de al menos tres variables relacionadas con la calidad del aire como PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y CO₂.
- Que utilicen tecnología IoT para la transmisión de datos.

Referente a los actores de las estaciones de medición IoT.

- Experiencia mínima de 3 años en monitoreo ambiental o tecnologías IoT.
- Participación en proyectos de calidad del aire o gestión ambiental en Colombia.
- Disposición para compartir información relevante sobre el uso de estaciones de monitoreo IoT.

3.2.3.7. Tamaño de la muestra

Selección de estaciones de monitoreo:

Selección de 4 estaciones de monitoreo de calidad del aire IoT de bajo costo de la red aqicn.org que estén ubicadas en distintas partes de Colombia, adicionalmente, las estaciones deben poseer al menos dos años del histórico de datos (2023-2024), que permitan realizar un análisis comparativo de las variaciones de las variables de la calidad del aire, desempeño y sostenibilidad operativa.

Datos históricos de calidad del aire:

Se emplearán registros de (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO₂) que provengan de estaciones de calidad del aire acreditadas como las del IDEAM, con un periodo de análisis de al menos dos años (2023-2024) y que posean características comparables de las variables de calidad del aire respecto de las estaciones IoT de bajo costo.

Entrevistas semiestructuradas:

Realización de 4 entrevistas semi estructuradas con expertos en el área de IoT y/o gestores ambientales que permitan la identificación de los desafíos y oportunidades en la implementación de estas tecnologías en instituciones públicas y privadas.

Encuestas estructuradas:

Para tener una idea de la población de las Instituciones educativas en Colombia, se consultará las dos entidades que contienen los datos gubernamentales donde reposa la información que puede ser consultada, para ello tenemos el Ministerio de Educación Nacional – MEN <https://www.mineducacion.gov.co/portal/Ministerio/>, institución que se encarga de liderar y formular las políticas públicas educativas de Colombia, en este portal encontraremos la población de las Instituciones de educación Básica y media, y en segunda medida se consultará el Sistema Nacional de Información de la Educación Superior – SNIES <https://snies.mineducacion.gov.co/portal/>, en donde es la entidad de recopilar la información de todas las Instituciones de Educación Superior en Colombia.

La población de las instituciones de educación Básica y media (Colegios), fue consultada en https://www.datos.gov.co/Educacion/MEN_MATRICULA_EN_EDUCACION_EN_PREESCOLAR-B-SICA-Y-/sty3-c395/about_data, obteniendo la siguiente información:

Se tienen **75403** Colegios registrados en Colombia entre públicos y privados con una población de **14.443.725** estudiantes.

Por otra parte, indagando en la base de datos del SNIES <https://snies.mineducacion.gov.co/portal/Informes-e-indicadores/Resumen-indicadores-Educacion-Superior/>, se tiene la siguiente población de estudiantes y docentes.

Se tienen un total de **300** instituciones de educación superior tanto públicas como privadas registradas en el SNIES con una población total de **2.466.228 personas**.

Se espera que, de la población total, en promedio contesten la encuesta alrededor del 1% de toda la población, se estimaría que la población total es:

$$N = (\text{Estudiantes Básica y Media} + \text{Estudiantes de Educación Superior}) * 0,01$$

$$N = (14443725 + 2466228) * 0,01$$

$$N = 169099$$

Como no es posible hacer las encuestas para toda la población, se va a tomar una muestra representativa de la población aplicando una muestra probabilística.

Cálculo del tamaño de la muestra

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{(N - 1) * E^2 + Z^2 * p * q}$$

Donde

- n es el tamaño de la muestra.
- N es el tamaño de la población
- Z es el valor Z correspondiente al nivel de confianza (1.96 para un nivel de confianza del 95%)
- p es la proporción esperadas (suponiendo un 50% si no se conoce)
- q=1-p
- E es el margen de error 5% o 0,05.

Aplicación de la fórmula para la determinación de la muestra

Para el cálculo de la muestra se desea tener un nivel de confianza del 95% y un error del 5%. Para ello se tienen los siguientes valores

$$N = 169099$$

$$Z = 1.96$$

$$p = 0.5$$

$$q = 0.5$$

$$E = 0.05$$

$$n = \frac{169099 * 1.96^2 * 0.5 * 0.5}{(169099 - 1) * 0.05^2 + 1.96^2 * 0.5 * 0.5}$$

$$n = 383.4$$

$$n \approx 384 \text{ encuestas}$$

De acuerdo con la muestra probabilística con un nivel de confianza del 95% y un error estimado del 5% se tiene que se deben realizar **384** encuestas a la comunidad interesada sobre el manejo de la calidad del aire en instituciones públicas y privadas que permitan la evaluación de la percepción de la utilidad y el acceso a la información.

3.3. Trabajo de campo.

El trabajo de campo realizado en el marco de esta investigación permitió la recopilación de información importante para la evaluar la percepción, el impacto y las oportunidades de mejora de las estaciones de calidad del aire y comparación con las estaciones de bajo costo que cuentan con tecnología IoT. En el Anexo A, se puede evidenciar los instrumentos aplicados para las encuestas, asimismo, las entrevistas a los expertos, en el Anexo B la recopilación de los datos de las fuentes oficiales y las salidas de campo. A continuación, se detalla el procedimiento desarrollado en el trabajo de campo, los recursos necesarios y el cronograma de actividades.

3.3.1. Organización y planificación

El trabajo de campo se desarrolló en función de los objetivos de la investigación, garantizando una adecuada recolección de datos para evaluar la implementación y optimización de estaciones IoT de monitoreo de calidad del aire en instituciones públicas y privadas en Colombia. Para ello, se estableció un cronograma de acciones, definiendo responsables, participantes y los recursos necesarios para su ejecución.

3.3.2. Procedimiento ejecutado

A continuación, se describen las fases del trabajo de campo, especificando las acciones desarrolladas y los actores involucrados:

Fase 1: Coordinación y selección de participantes.

- Acción: Identificación y selección de instituciones con estaciones IoT de monitoreo ambiental.
- Participantes: Investigador principal, responsables de mantenimiento de estaciones.
- Recursos: Bases de datos del IDEAM, contacto con instituciones (Cormacarena), revisión de normativas ambientales.

Fase 2: Aplicación de métodos de recolección de datos.

Observación directa en estaciones IoT

- Acción: Evaluación en campo de las estaciones IoT en términos de operatividad, mantenimiento y precisión de datos (Estación Parque de la Vida Cofrem).

- Participantes: Investigador principal.
- Recursos: Guía de observación, cámara fotográfica, registros técnicos.

Entrevistas a expertos en calidad del aire e IoT

- Acción: Aplicación de entrevistas semiestructuradas a especialistas en monitoreo ambiental y tecnología IoT.
- Participantes: Investigador principal, expertos en calidad del aire, ingenieros electrónicos.
- Recursos: Guion de entrevista, grabadora de audio y/o Grabación de Teleconferencia, consentimiento informado.

Encuestas a comunidad y actores de las instituciones públicas y/o privadas.

- Acción: Aplicación de cuestionarios estructurados a comunidad en general.
- Participantes: Investigador principal, comunidad de instituciones públicas y privadas.
- Recursos: Formato de encuesta en Google Forms, base de datos de encuestados.

Análisis documental y recolección de datos históricos

- Acción: Revisión de normativas, estudios previos y bases de datos sobre calidad del aire en Colombia.
- Participantes: Investigador principal.
- Recursos: Fichas de análisis documental, acceso a bases de datos del IDEAM, RMCAB y aqicn.

3.3.3. Cronograma de acciones

Se presenta a continuación el cronograma detallado del trabajo de campo:

Tabla 6.

Cronograma de acciones

Actividad	Fecha de ejecución	Responsables	Recursos
Selección de instituciones y contacto con participantes	08 de febrero al 20 de febrero de 2025	Investigador principal	Bases de datos, correos institucionales
Aplicación de observación directa	01 de abril al 08 de abril de 2025	Investigador principal	Guía de observación, cámara fotográfica

Realización de entrevistas	15 de febrero al 30 de marzo de 2025	Investigador principal, expertos	Guion de entrevista, grabadora de audio y/o Teleconferencia.
Aplicación de encuestas	01 de marzo al 30 de marzo de 2025	Investigador principal, comunidad.	Formulario en Google Forms
Análisis documental	01 de abril al 15 de abril de 2025	Investigador principal	Bases de datos, fichas de análisis documental

Nota: En la tabla se aprecia las acciones realizadas para cumplir eficazmente con las actividades asociadas a la recolección de información. Fuente: el autor.

3.3.4. Evidencias del trabajo de campo

En el anexo B se presentan evidencias del trabajo de campo, incluyendo:

- Fotografías de las estaciones IoT observadas.
- Transcripciones y resúmenes de entrevistas realizadas.
- Documentos analizados en el proceso de recolección de datos.

3.4. Aplicación de los instrumentos.

La aplicación de los instrumentos en esta investigación se desarrolló de manera estructurada con el objetivo de garantizar una óptima recolección de los datos y así maximizar su confiabilidad. En ese sentido, se emplearon tres estrategias fundamentales para realizar la recopilación de información: las encuestas, las entrevistas y la recolección de datos de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. A continuación, se describe el proceso de aplicación, los desafíos que se encontraron y las acciones implementadas para su viabilidad.

3.4.1. Aplicación de las encuestas

Procedimiento de aplicación: Se diseñó y validó la encuesta estructurada, dirigida principalmente a la comunidad educativa en donde los principales actores se constituían por estudiantes y docentes, y en menor medida el personal administrativo. Por otra parte, para asegurar una buena cobertura espacial y temporal y para brindar una mayor accesibilidad a la hora de la aplicación de la encuesta, se aplicaron de manera virtual mediante la plataforma Google Forms, herramienta que permitió la gestión de la encuesta en tiempo real. Asimismo, esta herramienta proporciona la tabulación de los datos de forma automática y su almacenamiento.

Finalmente, se obtuvieron las 384 respuestas, cumpliendo con el tamaño de la muestra determinado en la metodología.

3.4.2. Aplicación de las entrevistas

Las entrevistas permiten conocer en primera medida las vivencias y experiencias recolectadas a través del tiempo por los actores que interactúan con la problemática del estudio, en este caso la medición de variables ambientales que intervienen en la calidad del aire. Por esta razón, se hace importante la aplicación de entrevista a distintas personas que han realizado actividades que fungen esta labor, lo que permite abordar el estudio de investigación a partir de un panorama más amplio y con distintos enfoques y miradas, orientado al análisis de la información de una manera más técnica y ayude a minimizar los sesgos que se pueden presentar en el desarrollo de esta actividad.

Para la realización de las entrevistas, se hace necesario tener en cuenta la experiencia recolectada por los actores desde diferentes profesiones, iniciando desde la parte técnica y operativa, hasta llegar a labores de desarrollo de proyectos y análisis de la información recolectada. Es por ello, que se desarrollaron 4 guiones para cada uno de los expertos. A continuación, se listan los nombres de los guiones de cada una de ellas:

- Guion de entrevista para el experto en el área operativa de la comunicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. Anexo A
- Guion de entrevista para el experto en la administración de sistemas de monitoreo de calidad del aire. Anexo A
- Guion de entrevista para un experto en el área académica. Anexo A
- Guion de entrevista para el experto en proyectos desarrollados con temas de calidad del aire. Anexo A

La aplicación de las entrevistas se realizó por medio de la plataforma Teams a los expertos en el área operativa, al del área académica y al experto en del desarrollo de proyectos en temas de calidad del aire, mientras que la entrevista realizada al experto de la administración de sistemas de monitoreo de calidad del aire, se realizó en la salida de campo autorizada por Cormacarena en la estación de monitoreo de calidad del aire del parque de la vida Cofrem en el municipio de Villavicencio, Meta, Colombia.

Los testimonios de cada uno de los expertos permitieron complementar el análisis cuantitativo con una perspectiva cualitativa. Como evidencia las entrevistas fueron grabadas y analizadas mediante codificación temática.

3.4.3. Recolección de Datos de Estaciones de Monitoreo

Estado Actual

La recolección de datos de las estaciones de monitoreo del IDEAM y RMCAB y de estaciones de bajo costo con tecnología IoT como la de la red aqicn.org ha sido culminada. Se accedió a las diferentes bases de datos abiertas para la obtención de la información histórica sobre la calidad del aire, la cual ha sido comparada con los datos generados por las estaciones de bajo costo de aqicn.org.

Análisis realizado

- Se estructuraron los datos contaminantes medidos, priorizando los datos de las estaciones que tienen datos históricos dentro de la ventana de observación histórica. Asimismo, las estaciones de monitoreo deben incluir las variables de medición de al menos PM_{10} o $PM_{2.5}$ y NO_2 , O_3 y CO .
- Se realizaron análisis y comparación de tendencias entre estaciones de monitoreo oficiales y las estaciones de bajo costo.
- Se realizaron patrones en la variabilidad de las mediciones y se analizaron factores de correlación ambientales.

Resultados clave

- Se encontró una aceptable concordancia en la medición de material particulado entre los datos obtenidos de las estaciones oficiales y sensores de bajo costo con un margen de error aceptable.
- Se identificaron diferencias significativas en la calibración y sensibilidad de los sensores en estaciones de bajo costo respecto a las oficiales.
- Se elaboraron tablas y gráficos de correlación entre las mediciones de distintas fuentes.

3.4.4. Prueba Piloto y Validación de Instrumentos

Con el fin de garantizar la pertinencia y confiabilidad de los instrumentos, se realizó una prueba piloto con una muestra reducida de participantes antes de su aplicación final.

Resultados de la prueba piloto.

- Se identificaron oportunidades de mejora en la redacción de algunas preguntas de la encuesta, como por ejemplo cambio de preguntas con respuestas de (si o no) por escala tipo Likert para tener una percepción más amplia de la respuesta.
- Se ajustó y personalizó la estructura de la entrevista para garantizar respuestas más completas. Adicionalmente, y de acuerdo con el perfil de cada entrevistado, se realizaron preguntas específicas de acuerdo con su rol.

Los resultados obtenidos en la prueba piloto tanto para las encuestas como para las entrevistas permitieron optimizar ambos instrumentos antes de su aplicación final, minimizando errores y asegurando una recolección de datos efectiva.

3.5. Procesamiento de la información.

El procesamiento de la información recopilada en esta investigación fue una de las actividades clave para convertir los datos obtenidos en conocimientos relevantes que permitieran evaluar la percepción sobre la calidad del aire en instituciones educativas y la importancia de la adquisición de los datos y el desempeño de las estaciones de monitoreo de bajo costo con tecnología IoT. Para ello, existe la necesidad de emplear diversas herramientas de análisis que permitieran la organización de la información de manera simplificada, así como la planificación, estructuración y transformación final de los datos en insumos útiles y viables para el estudio.

3.5.1. Procesamiento de los Instrumentos Aplicados.

Encuestas

En el análisis de las encuestas aplicadas a los actores de la comunidad educativa, se emplearon dos herramientas principales. La primera, Google Forms para la aplicación de la encuesta de forma virtual, lo que permitió su gestión y almacenamiento de forma organizada. La segunda, el software de ofimática Microsoft Excel como herramienta de procesamiento para la realización de gráficas y el análisis de tendencias. Asimismo, con los datos preprocesados en

Excel se aplicaron técnicas de análisis descriptivo e inferencial, con el fin de identificar patrones sobre la percepción de la calidad del aire y la implementación de tecnología IoT en su monitoreo. A continuación, se presentan los principales procedimientos realizados:

- Estandarización de datos y respuestas y la eliminación de respuestas incompletas.
- Análisis de frecuencias y tendencias en las respuestas.
- Correlación entre las variables principales para evaluar el nivel de conocimiento y la percepción sobre la contaminación del aire por parte de la comunidad académica.

Entrevistas con Expertos

Para realizar el procesamiento de las entrevistas realizadas a cada uno de los expertos en calidad del aire y tecnologías IoT, se utilizó un enfoque de análisis basado en la categorización y clasificación de las respuestas según el perfil entrevistado, asimismo, se tuvo en cuenta las temáticas establecidas para cada rol. El procedimiento se estructuró en los siguientes pasos:

- Revisión de las grabaciones de las entrevistas, y se apoyó en la transcripción generada de manera automática de Microsoft Teams para la obtención de las respuestas obtenidas por cada experto.
- Análisis e identificación de respuestas comunes en la entrevista sobre las opiniones de los expertos.
- Clasificación de los hallazgos en distintas categorías como los inconvenientes en el monitoreo de variables ambientales, la percepción sobre las estaciones de bajo costo y las posibles recomendaciones para su mejora.
- Realización de la síntesis de los resultados por medio de cuadros resumen que faciliten su interpretación y comparación con los datos obtenidos en la investigación.

Guías de observación

En el trabajo de campo realizado sobre las visitas a las estaciones de monitoreo de calidad del aire de Cormacarena, se aplicaron las guías de observación estructuradas que permitieron establecer el estado de la infraestructura de cada una de las estaciones (operatividad), el funcionamiento de los sensores y la precisión en la recolección de datos. Asimismo, se determinó el intervalo de tiempo del envío de los datos. Para el procesamiento de esta información se realizaron las siguientes acciones:

- Digitalización de las fichas de observación con variables específicas como estado físico, operatividad y conectividad de las estaciones.

- Comparación de observaciones entre estaciones IoT de bajo costo y estaciones de autoridades ambientales (Cormacarena).
- Integración de los hallazgos con el análisis de los datos históricos obtenidos.

Datos de Estaciones de Monitoreo

Para la evaluación de los datos de calidad del aire, se seleccionaron ocho (8) estaciones de monitoreo, 2 administradas por el IDEAM, 2 por la RMCAB y 4 por la red aqicn. La elección de las estaciones se basó en el acceso a la información de los datos de estaciones de calidad del aire de fuentes oficiales, y que al mismo tiempo existiera fuentes de información de estaciones de Calidad del aire IoT en la misma ubicación. Asimismo, hubo la necesidad de verificar que existiera la disponibilidad de los datos en el periodo de observación (2023-2024). A continuación, se describen las características de operación de las estaciones, y la fuente de información:

Tabla 7.

Estaciones de monitoreo de calidad del aire seleccionadas.

Nombre de la Estación	Ciudad	Fuente de información de los datos Oficiales	Variables medidas.	Fuente de información de los datos de estaciones IoT de bajo costo.	Variables medidas
Puente Aranda	Bogotá - Colombia	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, O ₃ , NO NO ₂ , NOX, SO ₂	Índice Mundial de Calidad del Aire - https://aqicn.org/	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, O ₃ , NO ₂
Las Ferias	Bogotá - Colombia	Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB)	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, O ₃ , NO NO ₂ , NOX.	Índice Mundial de Calidad del Aire - https://aqicn.org/	PM ₁₀ , PM _{2.5} , CO, O ₃ , NO ₂
Santa Elena	Medellín - Colombia	Subsistema de Información sobre Calidad del Aire SISAIRE del IDEAM	PM _{2.5}	Índice Mundial de Calidad del Aire - https://aqicn.org/	PM _{2.5}

Tanques la Ye	Medellín - Colombia	Subsistema de Información sobre Calidad del Aire SISAIRE del IDEAM	PM _{2.5} , O ₃	Índice Mundial de Calidad del Aire - https://aqicn.org/	PM _{2.5} , O ₃
---------------	---------------------	--	------------------------------------	--	------------------------------------

Nota: En la tabla se aprecia las estaciones de monitoreo de calidad del aire seleccionadas para el estudio. Fuente: El autor.

Se procesaron datos históricos de variables ambientales clave categorizando las estaciones con las variables de medición disponibles como PM_{2.5}, PM₁₀ y O₃ en la mayoría de las estaciones tanto de fuentes oficiales como las del Índice Mundial de Calidad del Aire - <https://aqicn.org>. Para ello se usaron técnicas de análisis de series temporales y comparaciones estadísticas. Las acciones desarrolladas incluyeron:

- Extracción y limpieza de datos de las plataformas digitales.
- Normalización de unidades de medida para garantizar comparabilidad.
- Elaboración de gráficos de tendencias y correlaciones entre las mediciones de distintas estaciones.
- Identificación de discrepancias entre los valores reportados por estaciones IoT y estaciones de fuentes oficiales.

3.5.2. Evaluación de la Efectividad del Procesamiento de Datos.

La implementación de las distintas estrategias de recolección y procesamiento de datos permitió garantizar un análisis robusto y detallado. Se identificaron las siguientes fortalezas y desafíos en el proceso:

Fortalezas:

- Comparación de métodos aplicados (encuestas, entrevistas, observación y análisis de datos históricos), lo que permitió obtener una visión integral del fenómeno estudiado.
- Uso de herramientas estadísticas y cuantitativas accesibles para el procesamiento de datos.
- Análisis comparativo entre estaciones IoT y de fuentes oficiales, lo que permitió evaluar la fiabilidad de las tecnologías de bajo costo.

Desafíos:

- Diferencias en la periodicidad de medición entre estaciones, lo que requirió ajustes en la normalización de datos.
- Baja disponibilidad de las variables equivalentes de medición entre las estaciones de fuentes oficiales y las estaciones IoT de bajo costo.
- Necesidad de fortalecer la calibración y mantenimiento de las estaciones IoT para mejorar la precisión de sus mediciones en comparación con las de fuentes oficiales.

3.6. Análisis de los resultados en los datos obtenidos.

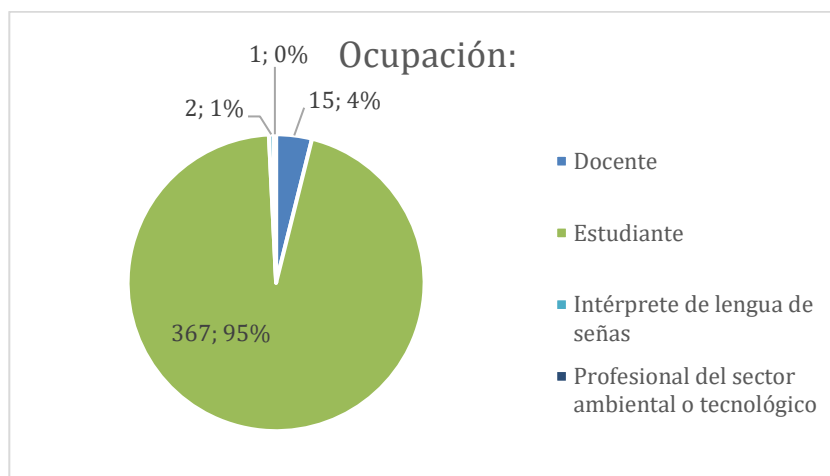
El análisis de los resultados obtenidos en esta investigación derivados de las encuestas, entrevistas, observaciones de las estaciones de monitoreo de calidad del aire y el análisis de los datos históricos, permitió la identificación de tendencias, correlaciones e incluso patrones que brindaron un soporte fundamental en el desarrollo de esta tesis doctoral. Así, que, a través de las representaciones gráficas y análisis de los resultados, se desarrolló la interpretación de la información priorizando los datos más relevantes y significativos de manera estructurada que permitan la identificación clara de los hallazgos que tengan relación con los objetivos de la tesis.

3.6.1. Análisis de las encuestas.

Como primera medida para realizar la evaluación de la percepción de la comunidad educativa sobre la calidad del aire y la posible adopción de tecnologías IoT en el monitoreo de variables ambientales, se realizó el análisis de los datos obtenidos a partir de las 385 personas encuestadas entre estudiantes, docentes y administrativos de diversas instituciones educativas. A continuación, se presentan la caracterización y los resultados más relevantes.

Caracterización de la población de la comunidad educativa: El 95% de los encuestados son estudiantes tanto de educación superior y colegios, mientras que el 4% son docentes y el restante de la población se caracterizan por ejercer funciones administrativas dentro de la institución incluyendo a un profesional del sector ambiental o tecnológico.

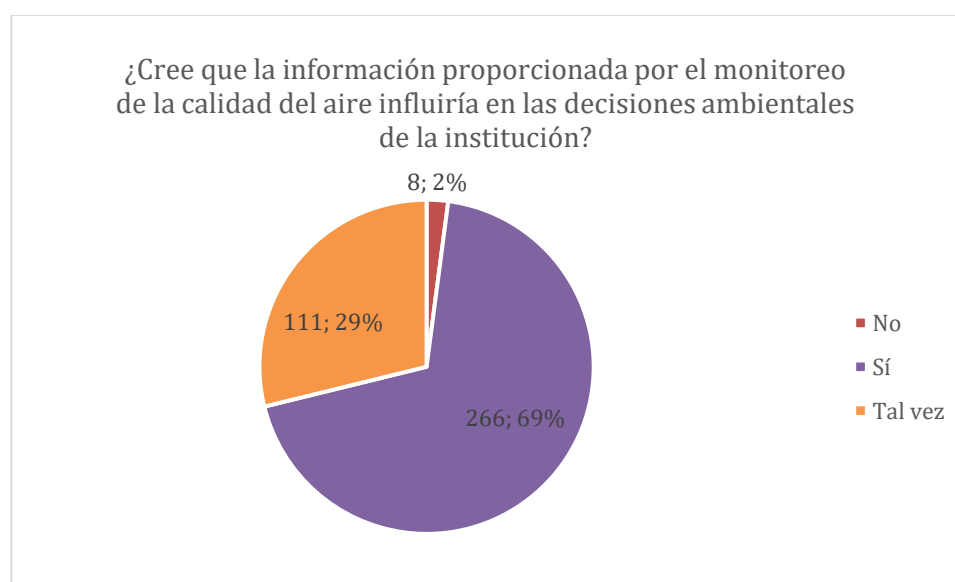
Figura 20.
Ocupación de los encuestados



Nota: Ocupación de los encuestados de las instituciones. Fuente: El autor

Percepción de la calidad del aire en las instituciones: El 69% de los encuestados consideran que la información proporcionada por el monitoreo de la calidad del aire podría influir en las decisiones ambientales de la institución, mientras que el 29% piensan que “tal vez” y el 2% creen que definitivamente no tendrían relación con las decisiones de la institución.

Figura 21.
Información sobre la calidad del aire en la Institución

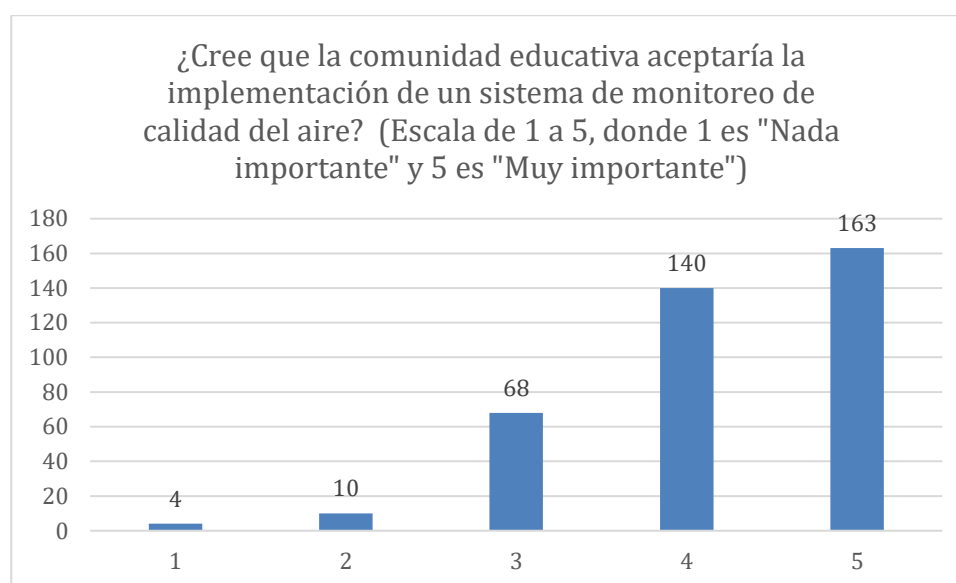


Nota: Respuesta de los participantes indicando la importancia de la medición de variables ambientales en la institución. Fuente: El autor.

Importancia de medir la calidad del aire en las instituciones: 303 personas del total de encuestados de la comunidad académica le asignó una alta importancia a la medición de la calidad del aire en su institución, con más del 78.70% dentro de un nivel de importancia entre 4 y 5 en una escala de relevancia del 1 al 5.

Figura 22.

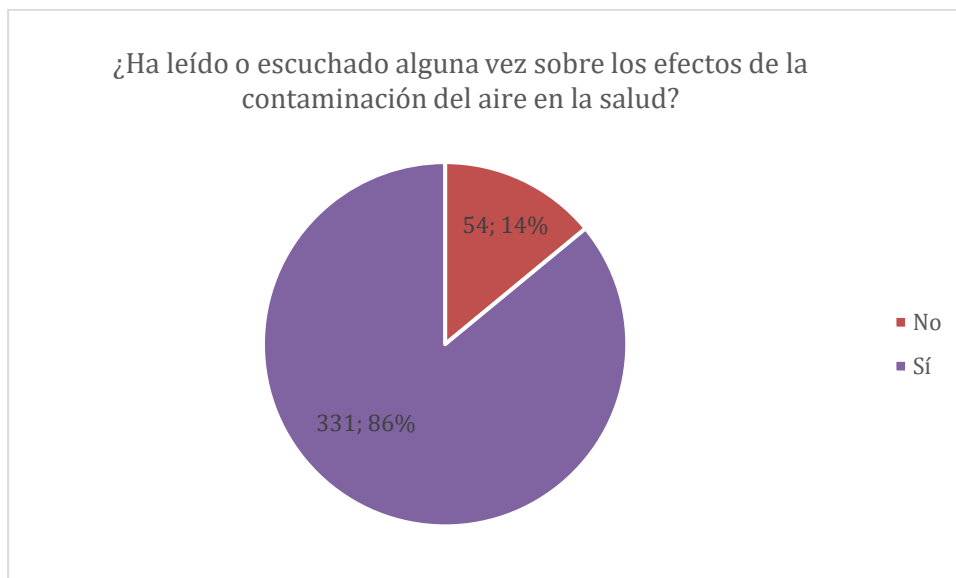
Nivel de aceptación de la implementación de sistemas de monitoreo de calidad del aire.



Nota: En la gráfica se observa que existe un alto nivel de aceptación por parte de la comunidad educativa en la implementación de sistemas de monitoreo. Fuente: El autor.

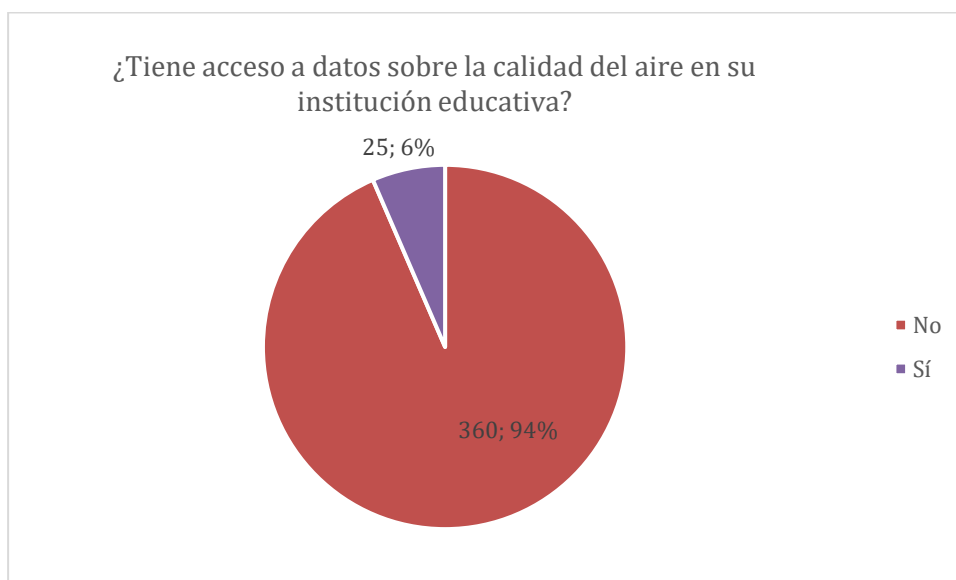
Nivel de conocimiento y acceso a los datos de monitoreo ambiental: El 86% de los encuestados indican que han leído o escuchado alguna vez sobre los efectos de la contaminación del aire a la salud. Asimismo, y a pesar de que un gran número de encuestados conoce los efectos sobre la salud, el 94% de los encuestados indican que no tienen acceso a datos sobre calidad del aire en su institución educativa, y tan solo el 6% de los encuestados tienen acceso a datos de calidad del aire en su entorno.

Figura 23.
Percepción de la calidad del aire sobre la salud.



Nota: En la figura se observa que el 86% de los encuestados de la comunidad académica ha leído o escuchado sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud. Fuente: el autor.

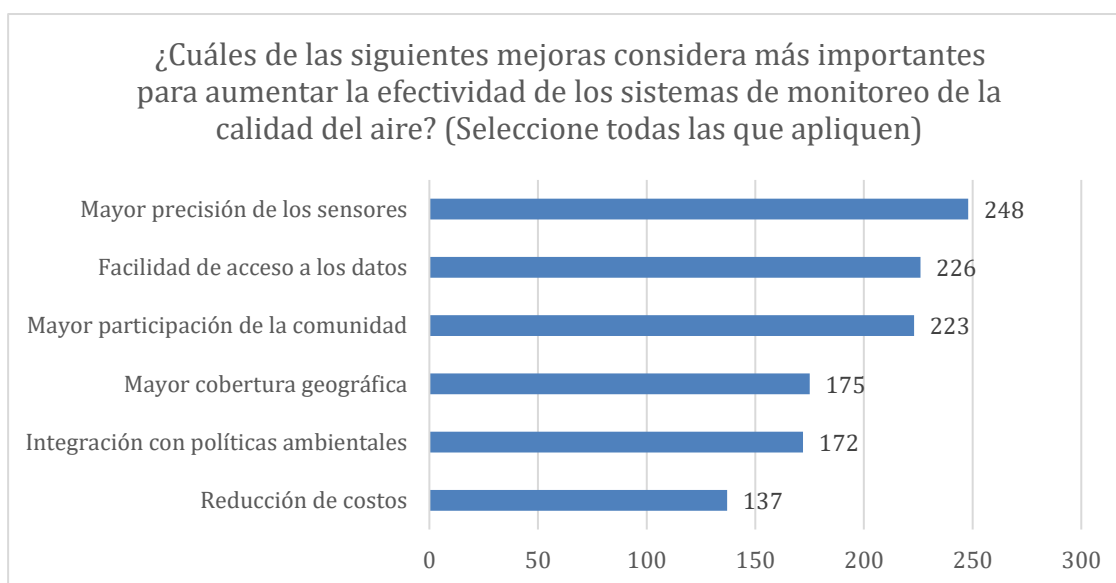
Figura 24.
Acceso a la información sobre calidad del aire.



Nota: En la figura se observa que el 94% de los encuestados de la comunidad académica no tiene acceso a los datos sobre la calidad del aire en su institución. Fuente: el autor.

Factores de mejora en los sistemas de monitoreo: Dentro de la comunidad educativa encuestada, el 64% de los participantes consideran que, para tener mejoras en la efectividad de los sistemas de monitoreo de calidad del aire, se debe tener una mayor precisión de los sensores, asimismo, el segundo criterio relevante con el 58% de las respuestas es la facilidad de acceso a los datos y en tercer lugar con el 57% una mayor participación de la comunidad.

Figura 25.
Percepción sobre las mejoras para aumentar la efectividad de los sistemas de monitoreo.

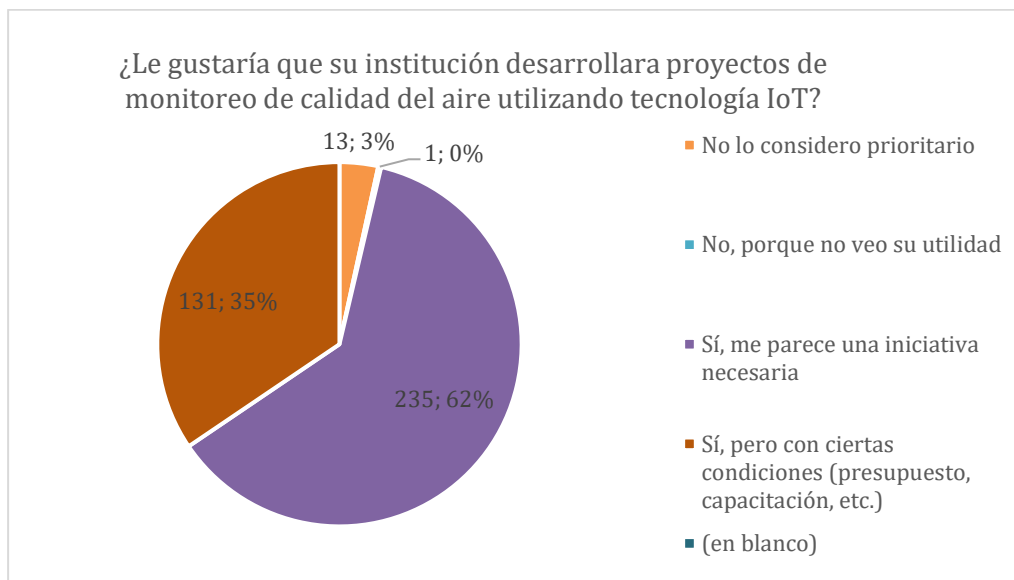


Nota: En la figura se aprecia diversas opciones en las cuales se puede beneficiar la efectividad de los sistemas de monitoreo. Fuente: El Autor.

Interés en proyectos de monitoreo con tecnología IoT: El 62% de los encuestados manifestó su interés en que la institución implemente proyectos de monitoreo de calidad del aire con tecnologías IoT, mientras que un 35% manifestaron que, si les gustaría este tipo de implementaciones, pero con ciertas condiciones como presupuesto y un plan de capacitación a la comunidad.

Figura 26.

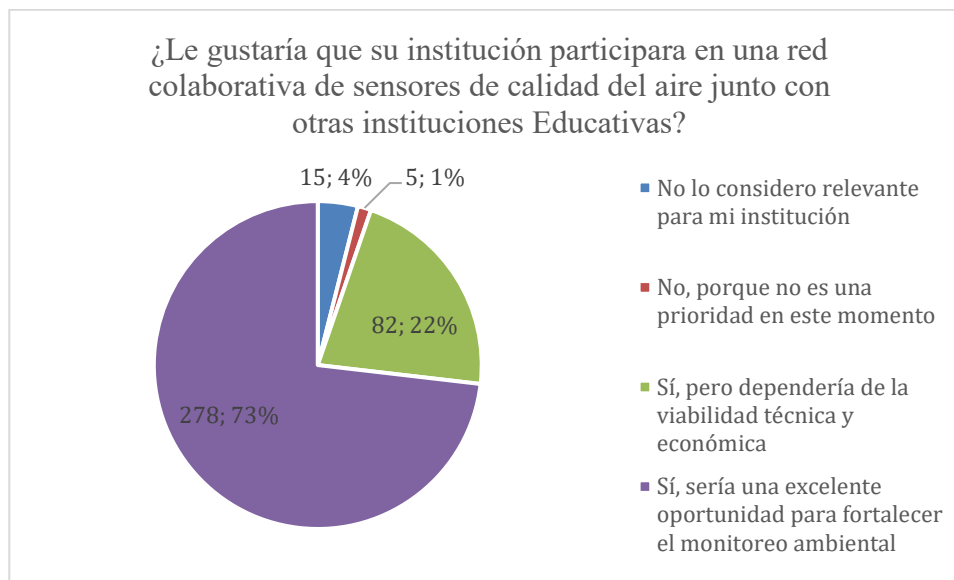
Percepción sobre el desarrollo de proyectos de monitoreo de calidad del aire.



Nota: En la figura se observa que iniciar proyectos de monitoreo de calidad del aire es bien percibido por la comunidad académica. Fuente: El Autor.

Colaboración interinstitucional: El 73% de los encuestados les gustaría que se realizarán proyectos de medición de calidad del aire basado en una red de sensores con otras instituciones educativas, indicando que esta red se puede fortalecer el monitoreo de variables ambientales.

Figura 27.
Iniciativa sobre participación de proyectos en Red.

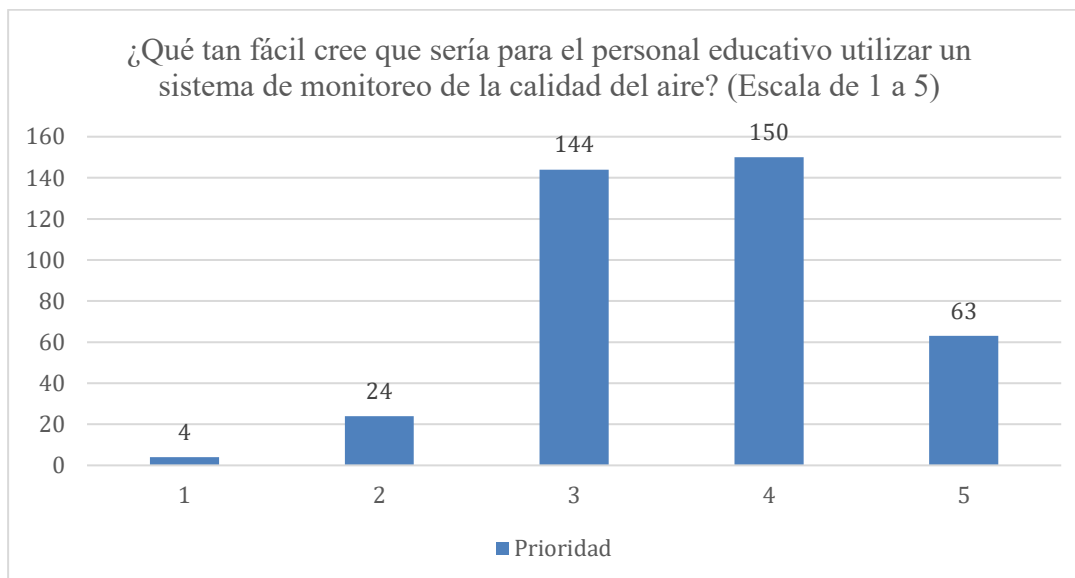


Nota: En la figura se observa que la comunidad académica considera una buena oportunidad trabajar en red con otras instituciones. Fuente: El Autor.

Facilidad de uso de los sistemas de monitoreo: el 55.3% de los encuestados consideran que el uso de los sistemas de monitoreo de calidad del aire podría ser de fácil uso para la comunidad educativa, clasificándolos entre 4 y 5 en una escala de 1 al 5. Lo que puede inferir la necesidad de realizar alguna capacitación para su uso.

Figura 28.

Percepción sobre la facilidad del uso de sistemas de monitoreo.

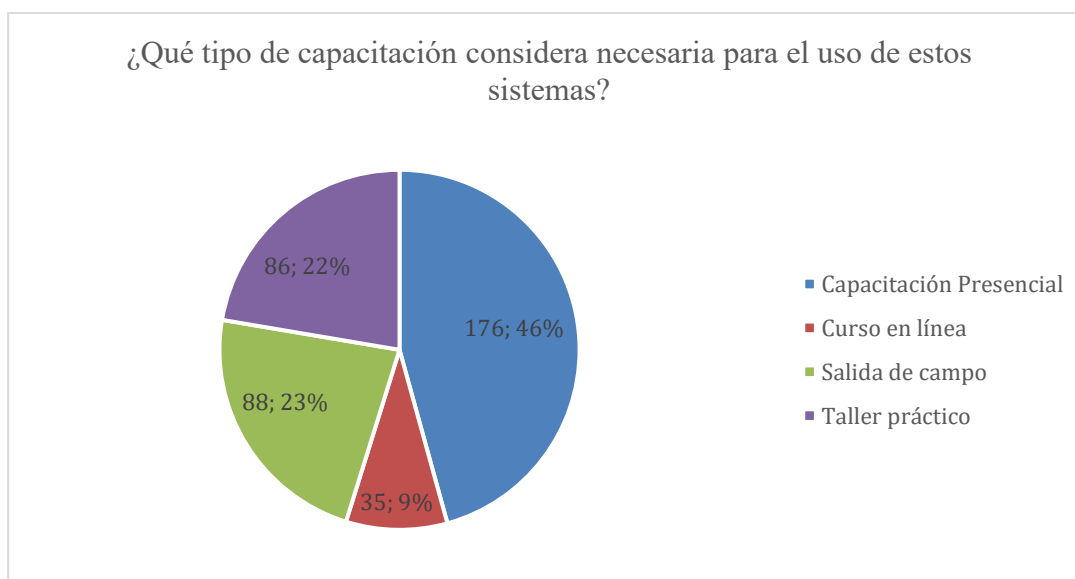


Nota: En la figura se observa la percepción en escala Likert sobre la facilidad del uso de sistemas de monitoreo. Fuente: El Autor.

Capacitación necesaria para el uso de estos sistemas: 176 personas de los encuestados indica que preferirían capacitaciones presenciales (46%), mientras que 88 de ellas preferirían salidas de campo (23%) y finalmente 86 de ellas consideran que obtendrían una mejor experiencia si se realizarán talleres prácticos (22%).

Figura 29.

Tipos de capacitación para los sistemas de monitoreo.



Nota: En la figura se observa los diferentes tipos de capacitación que se pueden ofrecer a la comunidad académica. Fuente: El Autor.

Los resultados obtenidos a través del instrumento de la encuesta virtual reflejan que, el 69% de los encuestados de la comunidad educativa tienen la percepción general que existen problemas de calidad del aire en su entorno. Por otra parte, el 62% de los encuestados consideran importante que la institución educativa donde están vinculados desarrolle proyectos de monitoreo de calidad del aire, sin embargo, el 35% de ellos considera que, si bien es importante la implementación de estos proyectos, se hace necesario tener en cuenta criterios de presupuesto y capacitación a la hora de la formulación y desarrollo.

3.6.2. Análisis de entrevistas con expertos

En este apartado se realiza el análisis cualitativo de las entrevistas aplicadas a cuatro actores clave en el ámbito del monitoreo de calidad del aire, visto desde diversas perspectivas de actuación en esta temática de investigación: un doctor en ingeniería Física, un técnico en estaciones de medición, un especialista en medición ambiental con experiencia en IoT y un funcionario de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena).

Las entrevistas se estructuraron en torno a preguntas abiertas que permitieran identificar oportunidades, desafíos y propuestas metodológicas relacionadas con la implementación de estaciones de monitoreo de bajo costo basadas en tecnología IoT. Las entrevistas fueron realizadas por medio de la herramienta Teams para los tres primeros expertos, mientras que para el funcionario de Cormacarena se hizo in situ en una de las estaciones de medición con el fin de realizar una salida de campo a una estación real indicativa que es administrada por un ente territorial gubernamental.

Con el fin de hacer una identificación clara de las entrevistas y respuestas de cada uno de los expertos, se construye la siguiente tabla con la identificación de cada uno de ellos:

Tabla 8.
Nomenclatura e identificación de los expertos

Nomenclatura	Experto
E1	En Área operativa de la comunicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire
E2	En Administración de sistemas de monitoreo de calidad del aire
E3	En Área académica
E4	En proyectos desarrollados con temas de calidad del aire

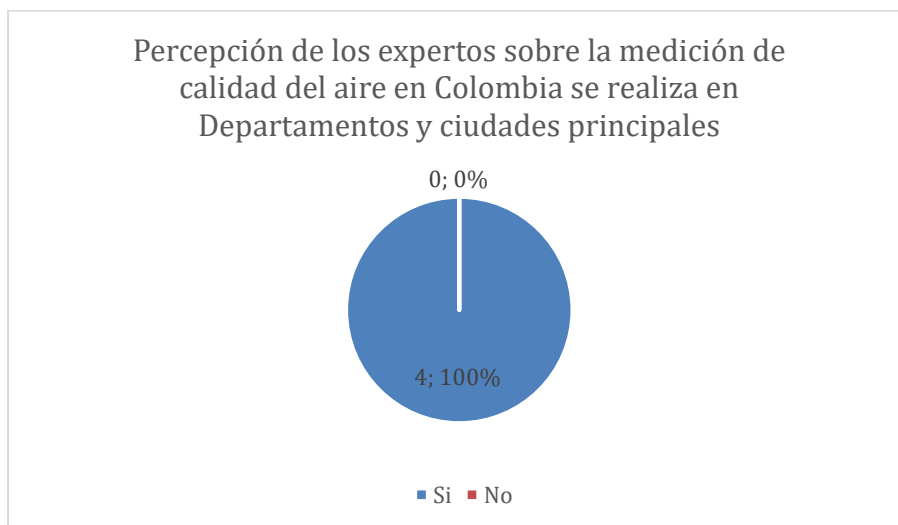
Nota: En la tabla se puede apreciar la nomenclatura e identificación de cada uno de los expertos entrevistados. Fuente el autor.

A continuación. Se presentan los resultados de los temas clave que se abordaron en cada una de las entrevistas que se encuentran en el anexo A de esta tesis doctoral, y se relaciona cada uno de los aportes de los entrevistados y su relación con los datos de las encuestas.

3.6.2.1. Estado actual del monitoreo de calidad del aire en Colombia: el 100% de los expertos entrevistados coinciden en que existen avances en ciudades principales de Colombia en donde se prioriza la medición de calidad del aire principalmente en departamentos como Antioquia, seguido por Cundinamarca y finalmente Valle del Cauca y el Cesar, aún existe una desigualdad territorial en el acceso y cobertura de estaciones. Se destaca una baja presencia de sistemas de monitoreo en ciudades intermedias y zonas rurales.

Figura 30.

Percepción de los expertos sobre el estado actual del monitoreo de calidad del aire en Colombia.



Nota: El 100% de los expertos consideran que Colombia prioriza la medición de calidad del aire en Departamentos y ciudades principales. Fuente el Autor.

Este hallazgo se relaciona con los datos de las estaciones de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVGA) de Colombia en donde 90 municipios de Colombia requieren implementar o mejorar los SVGA (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022).

Figura 31.
Número de estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia



Nota: En el gráfico se observa la cantidad de estaciones oficiales de monitoreo de calidad del aire en Colombia. Fuente (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022).

Finalmente, existe una relación con las encuestas realizadas a la comunidad académica, el 65.9% de los encuestados considera que contar con información sobre el monitoreo de la calidad del aire podría influir positivamente en decisiones ambientales de su territorio.

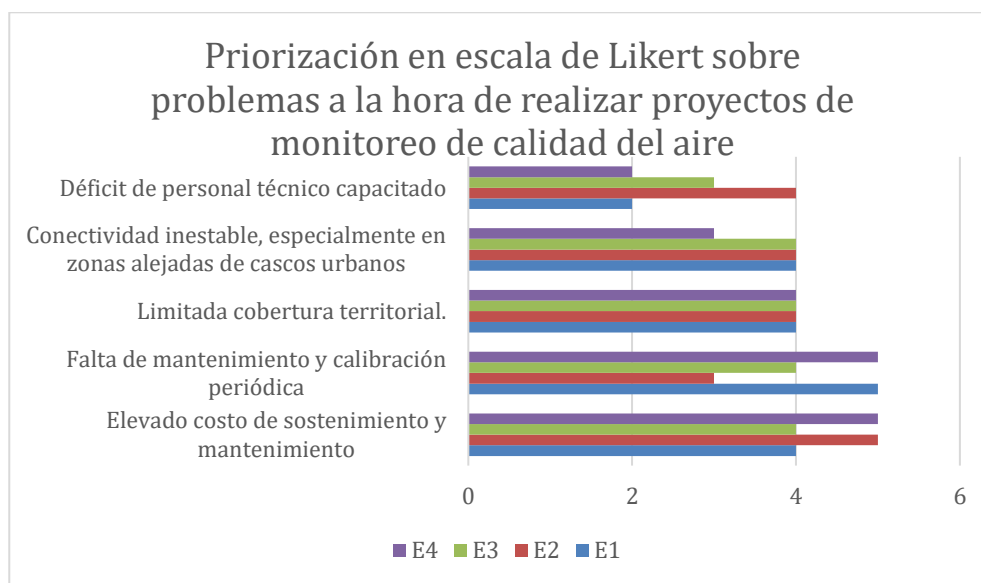
3.6.2.2. Principales retos técnicos y operativos: Los expertos identificaron en sus intervenciones diversos retos y desafíos recurrentes que enfrentan los sistemas de monitoreo de calidad del aire. Para este análisis se realizó una escala de Likert con calificación 1 a 5, en donde 1 es una relevancia baja y 5 una alta relevancia para la implementación de proyectos de monitoreo de calidad del aire en Colombia. De acuerdo con la entrevista se obtuvo a cada uno de los expertos se encontró el promedio de cada uno de los retos, priorizando de la calificación más alta a la más baja.

Tabla 9.
Retos percibidos por los Expertos sobre el monitoreo de la Calidad del aire en Colombia.

Reto Percibido	E1	E2	E3	E4	Promedio
Elevado costo de sostenimiento y mantenimiento	4	5	4	5	4,50
Falta de mantenimiento y calibración periódica	5	3	4	5	4,25
Limitada cobertura territorial.	4	4	4	4	4,00
Conectividad inestable, especialmente en zonas alejadas de cascos urbanos	4	4	4	3	3,75
Déficit de personal técnico capacitado	2	4	3	2	2,75

Nota: En la tabla se observan los retos priorizados por calificación por parte de los expertos, en donde el principal reto que perciben los expertos es el elevado costo del sostenimiento y mantenimiento. Fuente el autor.

Figura 32.
Retos técnicos y operativos de proyectos de monitoreo de calidad del aire en Colombia.



Nota: En el gráfico se observa la percepción de los expertos sobre los problemas que pueden afrontarse a la hora de realizar proyectos de monitoreo de calidad del aire. Fuente: el autor.

Los aspectos relacionados anteriormente concuerdan con la información obtenida en las observaciones de campo y análisis de estaciones, las cuales algunas presentan vacíos en los datos o registros discontinuos, lo que afecta significativamente el cumplimiento del protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Según el (Instituto de Hidrología Meteorología y

Estudios Ambientales (IDEAM), 2022) la representatividad temporal (o porcentaje de datos válidos) debe ser igual o superior al 75 % de los datos, para que estos sean considerados representativos, y sea posible usarlos con fines regulatorios y efectuar una adecuada comparación normativa.

3.6.2.3. Potencial del IoT en el monitoreo ambiental: Los expertos entrevistados reconocen ampliamente el valor del Internet de las Cosas (IoT) como tecnología emergente facilitadora para mejorar el acceso a los datos. De acuerdo con una escala tipo Likert, los expertos calificaron en escala de 1 a 5, donde 1 es bajo potencial de aplicación y 5 es alto grado de aplicación cada característica potencial que se puede obtener al adoptar este tipo de tecnologías. Entre los principales aspectos se destaca:

Tabla 10.

Característica aprovechable de implementación de tecnologías IoT en proyectos de medición de calidad del aire.

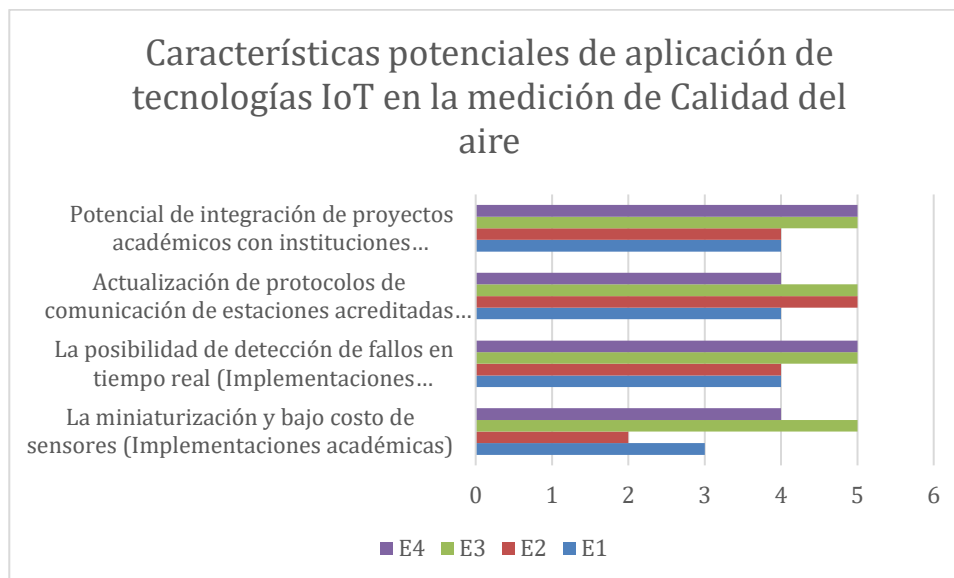
Característica derivada de aplicación de tecnologías IoT	E1	E2	E3	E4	Promedio
La miniaturización y bajo costo de sensores (Implementaciones académicas)	3	2	5	4	3,5
La posibilidad de detección de fallos en tiempo real (Implementaciones académicas y gubernamentales)	4	4	5	5	4,5
Actualización de protocolos de comunicación de estaciones acreditadas e indicativas automáticas, pasando de protocolos de comunicación GPRS a redes 5G.	4	5	5	4	4,5
Potencial de integración de proyectos académicos con instituciones gubernamentales como Cormacarena	4	4	5	5	4,5

Nota: En la tabla se aprecia la percepción de los expertos sobre las características que se pueden aprovechar al aplicar la tecnología IoT a proyectos de monitoreo de calidad del aire.

Fuente el autor.

Figura 33.

Características potenciales de aplicación de tecnologías IoT en la medición de Calidad del aire



Nota: En la figura se aprecia la percepción de los expertos sobre las características que se pueden aprovechar al aplicar la tecnología IoT a proyectos de monitoreo de calidad del aire en Colombia. Fuente el autor.

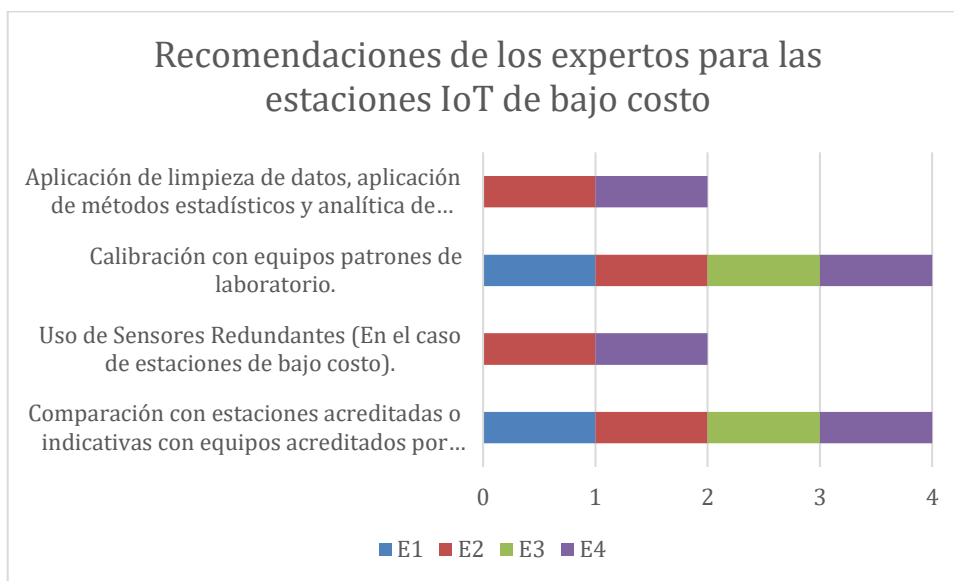
En la tabla y figura anterior, se puede observar que la percepción de los expertos sobre la adopción de tecnologías IoT en proyectos de la calidad del aire traería beneficios significativos sobre la integración de proyectos académicos con instituciones gubernamentales, la actualización de protocolos de comunicación a redes de 5G y la posibilidad de detección de fallos en tiempo real con una calificación promedio de 4.5, mientras que la miniaturización y bajo costo de los sensores tiene una calificación promedio de 3.5, lo que indica que los expertos tienen claro que un sensor de bajo costo no puede dar una medida certificada como un sensor certificado por la EPA (Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos) sino solo una medida indicativa que tendría potencial para tomar medidas a nivel local de las instituciones.

La pertinencia de la aplicación de la tecnología IoT y sistemas de bajo costo para instituciones educativas, tiene una aceptación importante, puesto que para los encuestados, el 57.62% apoya su implementación y el 73% promueve la articulación de redes colaborativas.

3.6.2.4. Los expertos sugieren la aplicación de diversas estrategias que pueden mejorar la calidad de los datos en estaciones IoT. A continuación, se presentan las sugerencias que realizaron cada uno de ellos:

Figura 34.

Recomendaciones de los expertos para las estaciones IoT de bajo costo.



Nota: En la figura se muestra cada una de las recomendaciones mencionadas por cada uno de los expertos en las entrevistas sobre lo que se debe aplicar en estaciones IoT de bajo costo. Fuente el autor.

Tabla 11.

Recomendaciones de estrategias que se deben adoptar en estaciones IoT por parte de los expertos.

Recomendaciones	E1	E2	E3	E4
Comparación con estaciones acreditadas o indicativas con equipos acreditados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).	X	X	X	X
Uso de Sensores Redundantes (En el caso de estaciones de bajo costo).		X		X
Calibración con equipos patrones de laboratorio.	X	X	X	X
Aplicación de limpieza de datos, aplicación de métodos estadísticos y analítica de datos.		X		X

Nota: En la tabla, se aprecia las diferentes sugerencias ofrecidas por los expertos que deberían adoptar las estaciones de bajo costo que apliquen tecnologías IoT. Fuente el autor.

En cada una de las entrevistas se recopiló las sugerencias de los expertos sobre recomendaciones técnicas y operativas que debería tener una estación IoT de bajo costo, en la tabla y figura anterior, se aprecia que el 100% de los expertos recomiendan realizar comparaciones con estaciones acreditadas o indicativas con equipos acreditados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y una calibración de los sensores con equipos patrones de laboratorio, por otra parte, el 50% de ellos recomienda el uso de Sensores redundantes y la aplicación de limpieza de datos, aplicación de métodos estadísticos y analítica de datos.

Esta información compartida por los expertos se respalda con el uso de correlaciones estadísticas entre las estaciones oficiales (acreditadas o indicativas) y las de bajo costo con tecnología IoT.

3.6.2.5. En la entrevista realizada a cada uno de los expertos se destacaron 4 ideas principales que deberían adoptarse en la implementación de proyectos de medición de calidad del aire con tecnología IoT que pueden llegar a potencializar este tipo de proyectos. A continuación, se listan las ideas principales propuestas por los expertos:

Tabla 12.

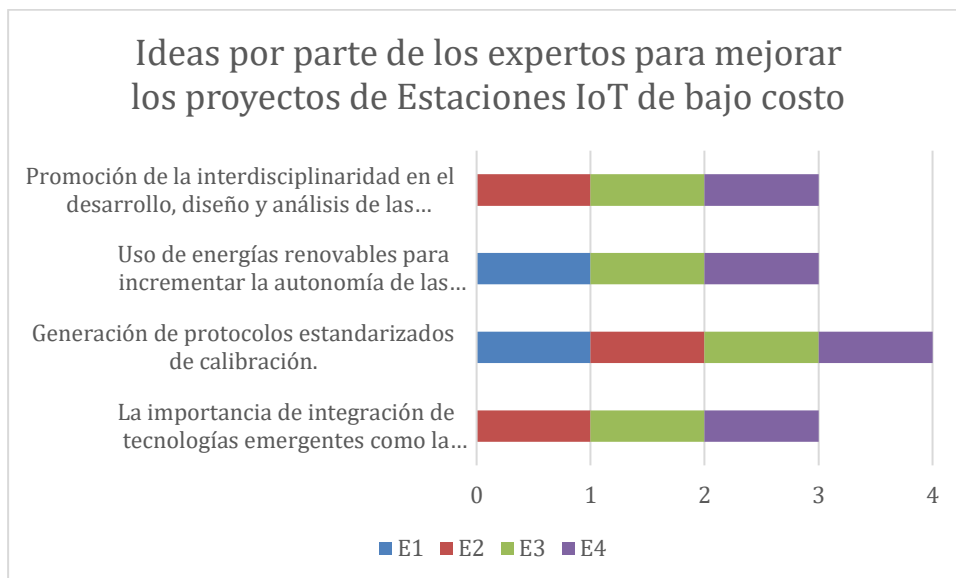
Ideas propuestas por los expertos en proyectos de calidad del aire de bajo costo con IoT.

Ideas propuestas por los expertos	E1	E2	E3	E4
La importancia de integración de tecnologías emergentes como la aplicación de inteligencia artificial y la aplicación de filtros de ruido para mejorar la precisión.		X	X	X
Generación de protocolos estandarizados de calibración.	X	X	X	X
Uso de energías renovables para incrementar la autonomía de las estaciones de monitoreo.	X		X	X
Promoción de la interdisciplinariedad en el desarrollo, diseño y análisis de las estaciones.		X	X	X

Nota: en la tabla se aprecia el conjunto de ideas propuestas por los expertos en calidad del aire sobre los proyectos IoT de bajo costo. Fuente el autor.

Figura 35.

Ideas por parte de los expertos para mejorar los proyectos de Estaciones IoT de bajo costo.



Nota: En la figura se realiza el conteo de las ideas propuestas que son similares por parte de los expertos en la implementación de proyectos de calidad del aire de bajo costo aplicando tecnologías IoT. Fuente el autor.

Realizando la cuantificación de las ideas propuestas por los expertos, se encuentra que el 100% de ellos considera importante la generación de protocolos estandarizados de calibración de los sensores de las estaciones IoT de bajo costo, mientras que el 75% de ellos perciben que es relevante la interdisciplinaridad de los integrantes del proyecto, el uso de las energías renovables para incrementar la autonomía de las estaciones y la integración de la inteligencia artificial junto con la aplicación de filtros electrónicos para asegurar la toma adecuada de los datos.

3.6.2.6. Los expertos en el tema de calidad del aire del sector académico coinciden que las instituciones académicas han hecho un mejor uso de los datos que el sector gubernamental. Puesto que en las instituciones académicas pueden generar directrices institucionales internas con mayor rapidez. Sin embargo, también manifiestan que existe una débil integración de los datos con las políticas públicas. Para lograr un mayor impacto, recomiendan:

- Mayor visibilidad y accesibilidad de los datos.

- Generación de proyectos con trayectoria y continuidad, con el fin de generar confianza por parte de las instituciones gubernamentales.
- Participación interdisciplinaria de diversas profesiones para convertir datos en decisiones efectivas.
- Generar un acercamiento y articulación de la academia con los entes territoriales y gubernamentales para el desarrollo de trabajos en conjunto.

Los resultados obtenidos sobre el análisis de la información recopilada por las entrevistas denotan un fortalecimiento de la pertinencia del objeto de estudio de esta tesis y validan los hallazgos preliminares obtenidos mediante las encuestas. Entre los entrevistados, existe un consenso sobre la necesidad de avanzar en la aplicación de metodologías que fortalezcan la confiabilidad de los sistemas de monitoreo basados en IoT, adicionalmente, su integración con estaciones acreditadas e indicativas para el diseño de políticas y proyectos que sean sostenibles para las instituciones públicas y privadas.

3.6.3. Análisis de datos de estaciones de monitoreo

El análisis de los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire se ha realizado sobre 8 estaciones de monitoreo, 4 estaciones de bases de datos oficiales, las primeras dos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y dos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Estas cuatro estaciones reflejarán los datos más cercanos a los reales, puesto que manejan equipos certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Por otra parte, se tienen 4 estaciones de bajo costo conectadas a la red aqicn.org. Las variables ambientales consideradas para medición son $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 y CO , tomando como base las variables comparables entre ambas estaciones (Oficiales y bajo costo). Adicionalmente, se toma como referencia los años 2023 y 2024, de acuerdo con la disponibilidad de los datos.

La elección de las estaciones de monitoreo comprendió la investigación y búsqueda de estaciones de monitoreo que se localizan en la misma ubicación geográfica, es decir, la misma ciudad y mismo punto geográfico de medición. Por otro lado, fue importante analizar si las estaciones compartían en su base de datos variables comparables y el acceso a los datos de los años 2023 y 2024.

3.6.3.1. Estación de Puente Aranda (Bogotá - Colombia)

Para esta zona se analizaron los datos históricos de calidad del aire ubicadas en el sector conocido como Puente Aranda, la estación de la base de datos oficiales proporcionada por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y la estación de datos de bajo costo proporcionada por la red internacional aqicn.org. Para esta estación en particular, las variables disponibles entre ambas fuentes de información son $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 y CO , correspondientes a los años 2023 y 2024.

- **Comparación general de datos históricos:**

Los resultados analizados entre ambas estaciones oficial vs de bajo costo, muestran una correlación moderada a alta en las tendencias mensuales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , lo que sugiere que las estaciones IoT tienen la posibilidad de captar adecuadamente los cambios de tendencia de material particulado. Por otra parte, para las variables de CO y NO_2 se identificaron diferencias significativas en los valores absolutos, presentando errores promedio superiores al 40%.

En cuanto a la variable de CO se evidencian discrepancias en el margen de error porcentual, con diferencias en algunos casos de hasta el 60%. Para $PM_{2.5}$, la diferencia porcentual promedio fue de alrededor del 25%, mientras que para O_3 se observó una variabilidad significativa durante los meses de baja radiación solar.

- **Gráficos de tendencias**

En los gráficos disponibles en el anexo B sobre el comportamiento de las variables a largo del tiempo se observa que:

Para $PM_{2.5}$, ambas estaciones presentan picos similares en los meses de enero, abril y octubre, lo que indica que la estación IoT mide adecuadamente las tendencias estacionales.

En CO , se evidencia un desfase entre ambas fuentes, probablemente causado por diferencias en la calibración del sensor o incluso podría verse afectada por interferencias electromagnéticas derivadas de la construcción interna del sensor.

NO_2 muestra variaciones más inestables en la estación IoT, con algunos valores atípicos durante los meses de junio y diciembre.

- **Evaluación del margen de error**

Tabla 13.
Estadísticas RMCAB para la estación Puente Aranda.

Variables	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
PM ₁₀	27,4	26,5	15,7	12,7	46,5%	4,4	63,0	627
CO	6,5	6,4	7,3	2,4	36,3%	1,0	15,8	605
O ₃	4,7	4,4	4,5	2,2	47,0%	1,0	13,6	620
NO ₂	9,5	9,4	9,9	4,4	47,1%	1,1	19,4	550
PM _{2.5}	48,7	52,8	12,9	25,0	51,4%	2,9	126,9	628

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos RMCAB para el año 2023 y 2024 de la estación Puente Aranda. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de RMCAB de la estación Puente Aranda, denotan que para esta estación se tienen 5 variables de medición, en donde la variable de CO se tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 2,4 al igual que de su coeficiente de variación del 36,3%, mientras que la variable de PM_{2.5} es la que tiene una desviación estándar de 25 la más alta de todas las variables y un coeficiente de variación del 51,4%, lo que indica que los datos son más consistentes para la variable de CO.

Tabla 14.
Estadísticas aqicn para la estación Puente Aranda.

Variable	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
PM ₁₀	25,0	25	15	12,1	48,2%	1	63	684
CO	4,6	4	4	1,9	40,3%	1	12	680
O ₃	6,2	6	4	3,3	53,0%	1	18	681
NO ₂	8,6	8	8	2,9	33,2%	1	17	686
PM _{2.5}	47,1	47	36	25,3	55,3%	3	124	684

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos aqicn para el año 2023 y 2024 de la estación Puente Aranda. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de aqicn de la estación Puente Aranda, denotan que para esta estación se tienen 5 variables de medición, en donde la variable de NO₂ tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 2,9 al igual que de su coeficiente de variación del 33,2%, mientras que la variable de PM_{2.5} tiene una desviación estándar de 25,3 la

más alta de todas las variables y un coeficiente de variación del 55,3%, lo que indica que la variable que tiene los datos más consistentes es NO₂.

El análisis sobre los datos de la estación Puente Aranda tanto de la RMCAB y aqicn muestra que:

La desviación estándar de PM_{2.5} fue casi la misma para la estación IoT (25.3µg/m³) en comparación con la oficial (25 µg/m³), lo que refleja una consistencia en las mediciones con el sensor de bajo costo.

Para la variable NO₂, la estación IoT presentó una ausencia de datos considerable (19.82%), en comparación con la oficial, que mantuvo su operación por más tiempo.

El coeficiente de variación (CV%) fue más alto en variables gaseosas en la estación IoT, lo que sugiere que los sensores de bajo costo requieren de una calibración con más frecuencia.

- **Comparativa y correlación de los datos**

A continuación, se presenta la tabla comparativa de los datos de la estación Puente Aranda de la fuente de datos oficial RMCAB y la fuente aqicn.

Tabla 15.

Comparativa y correlación de los datos de la estación Puente Aranda.

Variables	RMCAB	aqicn	Diferencia porcentual promedio	Correlación	Datos Comparables
	Promedio	Promedio			
PM ₁₀	27,4	25,0	9%	0,98	587
CO	6,5	4,6	29%	0,96	570
O ₃	4,7	6,2	31%	0,88	585
NO ₂	9,5	8,6	9%	0,98	517
PM _{2.5}	48,7	47,1	3%	0,70	588

Nota: En la tabla se puede apreciar la comparación de los datos de la estación Puente Aranda entre la base de datos RMCAB y aqicn para el periodo 2023 y 2024. Fuente: el autor.

Los datos analizados con la fuente de datos oficial RMCAB y aqicn denotan una diferencia porcentual promedio baja en la variable PM_{2.5} (3%) mientras que para el O₃ se presenta la diferencia más alta (31%). Sin embargo, La correlación de los datos es más consistente para PM₁₀ y NO₂ con una correlación de 0.98, mientras que para el PM_{2.5} la correlación es del 0.70.

3.6.3.2. Estación Las Ferias (Bogotá - Colombia)

La comparación de los datos entre la estación Las ferias provenientes de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y la estación de bajo costo conectada a la red aqicn.org, revela una importante correspondencia en las tendencias generales, sin embargo, se presentan algunas variaciones significativas en la magnitud de algunos contaminantes.

- **Comparación general de datos históricos:**

Los resultados analizados entre ambas estaciones oficial vs de bajo costo, muestran una correlación moderada a alta en las tendencias mensuales de PM_{10} , CO y NO_2 , lo que sugiere que las estaciones IoT tienen la posibilidad de captar adecuadamente los cambios de tendencia de material particulado de mayor tamaño. Por otra parte, para la variable de O_3 se identificó diferencias significativas en los valores absolutos, presentando errores promedio superiores al 35%.

- **Gráfico de tendencias:**

En los gráficos disponibles en el anexo B sobre el comportamiento de las variables al largo del tiempo para la estación se observa que:

Existe una fuerte similitud en la tendencia de PM_{10} entre ambas estaciones, con valores muy cercanos mes a mes.

Para O_3 , la estación IoT de bajo costo tiende a medir niveles más altos de forma sistemática en comparación con la estación RMCAB, lo que puede reflejar sobreestimación de la variable por parte del sensor o una falla de recalibración del sensor.

Para el caso de la variable de CO, ambas estaciones muestran consistencia en los picos de medición, sin embargo, para la estación IoT de bajo costo reporta menores concentraciones promedio.

- **Evaluación del margen de error**

Tabla 16.

Estadísticas RMCAB para la estación Las Ferias.

VARIABLES	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
PM₁₀	23,1	21,3	16,5	11,6	50,0%	4,5	57,6	611
CO	7,5	6,9	5,3	3,1	40,8%	2,4	18,1	475
O₃	7,4	6,8	6,4	3,2	42,4%	1,9	20,0	478
NO₂	7,8	7,1	6,8	3,5	44,4%	1,7	18,7	474
PM_{2,5}	53,2	53,7	35,4	23,0	43,1%	11,7	138,7	492

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos RMCAB para el año 2023 y 2024 de la estación Las Ferias. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de RMCAB de la estación Las Ferias, denotan que para esta estación se tienen 5 variables de medición, en donde la variable de CO tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 3,1 al igual que su coeficiente de variación del 40,8%, mientras que la variable de PM_{2,5} tiene una desviación estándar de 23, la más alta de todas las variables y un coeficiente de variación del 43.1%, lo que indica que la variable que tiene los datos más consistentes es CO.

Tabla 17.

Estadísticas aqicn para la estación Las Ferias.

Variable	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
PM₁₀	22,4	20	9	13,9	62,2%	4	58	477
CO	5,2	5	3	3,1	59,8%	1	14	479
O₃	10,0	9	7	5,4	54,2%	1	25	487
NO₂	5,9	5	4	3,6	60,7%	1	15	484
PM_{2,5}	52,0	49	38	29,7	57,1%	5	133	475

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos aqicn para el año 2023 y 2024 de la estación Las Ferias. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de aqicn de la estación Las Ferias, denotan que para esta estación se tienen 5 variables de medición, en donde la variable de CO tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 3,1 sin embargo, su coeficiente de

variación del 59,8%, mientras que la variable de $PM_{2.5}$ tiene una desviación estándar de 29.7, la más alta de todas las variables y un coeficiente de variación del 57,1%, para este caso si tomamos la desviación estándar como parámetro de consistencia de los datos la variable más consistente es CO, pero si se toma el coeficiente de variación como parámetro de consistencia la variable más consistente sería O_3 , la variable que obtuvo el menor coeficiente de variación.

La estación IoT de bajo costo de la red aqicn mostró una mayor desviación estándar en PM_{10} y $PM_{2.5}$, reflejando una mayor variabilidad en sus mediciones.

El coeficiente de variación fue más alto en todas variables de la estación IoT de bajo costo en comparación con la estación RMCAB, excepto para la variable $PM_{2.5}$ en donde el coeficiente de variación fue casi el mismo. Este comportamiento evidencia que la estación de bajo costo IoT tiene una menor estabilidad en los registros.

Para la variable $PM_{2.5}$, la estación IoT de bajo costo registró un valor promedio de $52.0\mu g/m^3$, frente a $15.2\mu g/m^3$ reportados por la estación oficial RMCAB, con una diferencia de más del 250%, lo que indica que esta variable presenta un sesgo en su lectura y no podría ser tomada en cuenta para esa estación de bajo costo.

- **Comparativa y correlación de los datos**

A continuación, se presenta la tabla comparativa de los datos de la estación Las Ferias de la fuente de datos oficial RMCAB y la fuente aqicn.

Tabla 18.

Comparativa y correlación de los datos de la estación Las Ferias.

Variables	RMCAB	aqicn	Diferencial porcentual promedio	Correlación	Datos Comparables
	Promedio	Promedio			
PM_{10}	23,1	22,4	3%	0,93	434
CO	7,5	5,2	31%	0,93	418
O_3	7,4	10,0	35%	0,79	420
NO_2	7,8	5,9	24%	0,91	409
$PM_{2.5}$	53,2	52,0	2%	0,80	422

Nota: En la tabla se puede apreciar la comparación de los datos de la estación Las Ferias entre la base de datos RMCAB y aqicn para el periodo 2023 y 2024. Fuente: el autor.

Los datos analizados con la fuente de datos oficial RMCAB y aqicn denotan una diferencia porcentual promedio baja en la variable $PM_{2.5}$ (2%) mientras que para el O_3 se

presenta la diferencia más alta (35%). Sin embargo, La correlación de los datos es más consistente para PM_{10} y CO con una correlación de 0.93, mientras que para el $PM_{2.5}$ la correlación es del 0.80.

3.6.3.3. Estación Santa Elena (Medellín - Colombia)

La comparación de los datos entre la estación Santa Elena provenientes del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la estación de bajo costo conectada a la red aqicn.org. Denota que la única variable comparable es el material particulado $PM_{2.5}$. Lo anterior debido a que es la única variable disponible en los datos de la red aqicn.

- **Comparación general de datos históricos:**

Los resultados analizados entre ambas estaciones oficial vs de bajo costo, muestran una correlación baja en las tendencias mensuales de $PM_{2.5}$, lo que sugiere la importancia de verificar los protocolos de la obtención de los datos de la estación IoT de bajo costo o una recalibración del sensor. Por otra parte, se observa que la diferencia porcentual promedio es del 1%, lo que indica que la variable medida se está sobreestimando y subestimando con respecto a la estación de monitoreo oficial.

- **Gráfico de tendencias:**

En los gráficos disponibles en el anexo B sobre el comportamiento de la variable en la ventana de observación se identifica que:

A pesar de que existe una fuerte similitud en la tendencia de $PM_{2.5}$ entre ambas estaciones, con valores muy cercanos mes a mes. Se observa que en algunos casos la medida de sobreestimación, mientras que en algunas temporadas se subestima el valor de la concentración del material particulado.

- **Evaluación del margen de error**

Tabla 19.

Estadísticas SISAIRE para la estación Santa Elena.

Variables	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
$PM_{2.5}$	42,2	39,1	27,5	16,9	40,1%	10,8	111,4	720

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos SISAIRE para el año 2023 y 2024 de la estación Santa Elena. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de SISAIRE de la estación Santa Elena, denotan que para esta estación solo se cuenta con 1 variable de medición la cual es $PM_{2.5}$. Se puede apreciar que esta variable cuenta con una desviación estándar de 16,9 y un coeficiente de variación del 40,1%, Vale la pena destacar que esta estación cuenta con 720 datos válidos de comparación.

Tabla 20.
Estadísticas aqicn para la estación Santa Elena.

Variable	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
$PM_{2.5}$	41,9	39	29	16,4	39,0%	13	107	698

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos aqicn para el año 2023 y 2024 de la estación Santa Elena. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de aqicn de la estación Santa Elena, denotan que para esta estación solo se cuenta con 1 variable de medición la cual es $PM_{2.5}$. Se puede apreciar que esta variable cuenta con una desviación estándar de 16,4 y un coeficiente de variación del 39%, Vale la pena destacar que esta estación cuenta con 698 datos válidos de comparación.

Las estaciones de IoT de bajo costo y la de la red oficial de SISAIRE muestran un comportamiento similar de la desviación estándar de sus datos para la variable de $PM_{2.5}$. Asimismo, como su coeficiente de variación, se aprecia que en el análisis individual de cada estación el comportamiento es similar en los datos.

- **Comparativa y correlación de los datos**

A continuación, se presenta la tabla comparativa de los datos de la estación Santa Elena de la fuente de datos oficial SISAIRE y la fuente aqicn.

Tabla 21.
Comparativa y correlación de los datos de la estación Santa Elena

Variable	SISAIRE	aqicn	Diferencia porcentual promedio	Correlación	Datos Comparables
	Promedio	Promedio			
$PM_{2.5}$	42,2	41,9	1%	0,77	692

Nota: En la tabla se puede apreciar la comparación de los datos de la estación Santa Elena entre la base de datos SISAIRE y aqicn para el periodo 2023 y 2024. Fuente: el autor.

Los datos analizados con la fuente de datos oficial SISAIRE y aqicn denotan una diferencia porcentual promedio baja para la variable $PM_{2.5}$ (1%). Sin embargo, La correlación de los datos es menos consistente para esta misma variable comparando los datos entre ambas estaciones puesto que se cuenta con una correlación de 0.77, lo que puede incidir que el sensor implementado en la estación de bajo costo necesite tener una calibración con respecto de un equipo patrón.

3.6.3.4. Estación Tanques la Ye (Medellín - Colombia)

La comparación de los datos entre la estación Tanques la Ye provenientes del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la estación de bajo costo conectada a la red aqicn.org. Denotan que las únicas variables comparables son el material particulado $PM_{2.5}$ y el O_3 . Lo anterior debido son las variables disponibles en los datos de la red aqicn.

- **Comparación general de datos históricos:**

Los resultados analizados entre ambas estaciones oficial vs de bajo costo, muestran una baja correlación en las tendencias mensuales de $PM_{2.5}$. Por otra parte, se observa que para el O_3 la correlación es más alta (0,87%), sin embargo, se presenta una alta diferencia porcentual promedio entre ambas estaciones superiores al 65%.

- **Gráfico de tendencias:**

En los gráficos disponibles en el anexo B sobre el comportamiento de la variable en la ventana de observación se identifica que:

A pesar de que existe una fuerte similitud en la tendencia de $PM_{2.5}$ entre ambas estaciones, con valores muy cercanos mes a mes. Se observa que en algunos casos la medida se sobreestima, mientras que en algunas temporadas se subestima el valor de la concentración del material particulado. Por otra parte, la variable de O_3 , presenta una sobreestimación de todas las medidas por parte de la estación IoT de bajo costo comparada con la estación oficial reportada por SISAIRE

- Evaluación del margen de error

Tabla 22.

Estadísticas SISAIRE para la estación Tanques la Ye.

Variables	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
O₃	15,4	14,7	0	6,1	39,6%	0,0	35,0	448
PM_{2.5}	58,3	56,9	57,8	15,0	25,8%	12,9	114,6	461

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos SISAIRE para el año 2023 y 2024 de la estación Tanques la Ye. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de SISAIRE de la estación Tanques la Ye, denotan que para esta estación se tienen 2 variables de medición, en donde la variable de O₃ tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 6,1 sin embargo su coeficiente de variación es de 39,6%, mientras que la variable de PM_{2.5} tiene una desviación estándar de 15, con un coeficiente de variación es del 25.8%.

Tabla 23.

Estadísticas aqicn para la estación Tanques la Ye.

Variable	Promedio	Mediana	Moda	Desviación estándar	CV%	Mínimo	Máximo	Cantidad de datos válidos
O₃	25,8	25	26	13,1	50,7%	1	62	376
PM_{2.5}	57,7	56	59	15,7	27,2%	13	110	452

Nota: Los datos presentados corresponden al análisis de datos disponibles en la base de datos aqicn para el año 2023 y 2024 de la estación Tanques la Ye. Fuente: El autor.

Los datos obtenidos de la base de datos de aqicn de la estación Tanques la Ye, denotan que para esta estación se tienen 2 variables de medición, en donde la variable de O₃ tiene la menor variación de los datos con una desviación estándar de 13,1 sin embargo su coeficiente de variación es de 50.7%, mientras que la variable de PM_{2.5} tiene una desviación estándar de 15,7 con un coeficiente de variación es del 27.2%.

Las estaciones de IoT de bajo costo y la de la red oficial de SISAIRE muestran un comportamiento similar de la desviación estándar de sus datos para la variable de PM_{2.5}. Por otra parte, para la variable O₃ se aprecia una variación del coeficiente de variación significativa del

11% entre ambas estaciones y una desviación estándar del doble para la estación IoT de bajo costo.

- **Comparativa y correlación de los datos**

A continuación, se presenta la tabla comparativa de los datos de la estación Tanques la Ye de la fuente de datos oficial SISAIRE y la fuente aqicn.

Tabla 24.

Comparativa y correlación de los datos de la estación Tanques la Ye.

	SISAIRE	aqicn	Diferencia porcentual promedio	Correlación	Datos Comparables
Variables	Promedio	Promedio			
O ₃	15,4	25,8	68%	0,88	370
PM _{2.5}	58,3	57,7	1%	0,63	451

Nota: En la tabla se puede apreciar la comparación de los datos de la estación Tanques la Ye entre la base de datos SISAIRE y aqicn para el periodo 2023 y 2024. Fuente: el autor.

Los datos analizados con la fuente de datos oficial SISAIRE y aqicn denotan una diferencia porcentual promedio baja para la variable PM_{2.5} (1%). Sin embargo, La correlación de los datos es menos consistente para esta misma variable comparando los datos entre ambas estaciones puesto que se cuenta con una correlación de 0.63. Por otra parte, para la variable O₃ existe una diferencia porcentual promedio significativa del 68%. Esto es consistente debido a la sobreestimación de la medición de la variable por parte de la estación IoT de bajo costo.

3.7. Redacción de resultados y discusión.

La interpretación y análisis de los resultados obtenidos a través de la aplicación de diversos instrumentos y técnicas de investigación aplicados en esta investigación permiten tener un panorama claro y objetivo que permite contrastar las conclusiones preliminares con el marco teórico planteado, fortaleciendo el rigor científico de la propuesta metodológica diseñada. En primera medida, y partiendo de la evidencia empírica recolectada mediante encuestas, entrevistas, análisis documental, observaciones técnicas y comparación de bases de datos históricas entre estaciones oficiales del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RM CAB), y las estaciones IoT de bajo costo del proyecto Índice Mundial de Calidad del Aire (aqicn); permite identificar

tendencias, disparidades, validar hipótesis y evidenciar las oportunidades de mejora que se pueden presentar el monitoreo de variables ambientales con tecnologías emergentes.

3.7.1. Tendencias generales identificadas

Percepción positiva de la comunidad educativa: La mayoría de los actores encuestados de la comunidad académica compuesta principalmente por estudiantes, seguido por docentes y en menor medida el personal administrativo, consideran importante iniciar el desarrollo de proyectos que permitan realizar una medición de la calidad del aire en sus instituciones, incluso se sienten motivados a participar en proyectos de trabajo en conjunto con otras instituciones, mostrando una buena disposición hacia la implementación de sistemas IoT. Esta actitud se contrasta con el 77.1% de los encuestados que valoró con la escala de importancia entre 4 y 5, y el 78.7% que apoya la creación de redes colaborativas entre instituciones.

Desconocimiento y falta de acceso a la información: dentro de la comunidad académica existe un alto interés sobre conocer y estar informados en aspectos ambientales de su institución, el 94% de los participantes de la encuesta respondieron que no tenían acceso a los datos sobre la calidad del aire en su institución. Adicionalmente, el 86% de ellos indican que alguna vez han leído o escuchado sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud. Adversamente, es muy reducido el número de personas que no conocen la existencia de plataformas, aplicaciones o sistemas en donde se puede acceder y consultar esta información; lo que evidencia una disparidad significativa entre la necesidad identificada y el contexto actual del acceso a la información sobre la calidad del aire y variables ambientales.

Validación empírica de las estaciones IoT: El análisis estadístico realizado entre las estaciones de monitoreo de calidad del aire oficiales del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), y las estaciones IoT de bajo costo del proyecto Índice Mundial de Calidad del Aire (aqicn), se aprecian correlaciones aceptables para algunas variables como PM₁₀ y CO, sin embargo, también se logró evidenciar una alta variabilidad en gases como el O₃ y el NO₂, con diferencias porcentuales superiores al 30%, lo cual se ve reflejado en la complejidad y alto costo del sensor de las fuentes oficiales acreditado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), sumándose a ello los protocolos de calibración estandarizados e incluidos dentro del mismo equipo que carecen los sensores de bajo costo que poseen las estaciones IoT.

3.7.2. Contraste con el marco teórico y estudios previos

De acuerdo con Blessing & Chakrabarti (2009), la investigación aplicada debe producir conocimiento útil y contextualizado. Esta tesis responde a este postulado al desarrollar una propuesta metodológica que busca mejorar el desempeño y confiabilidad de la información reportada por las estaciones de bajo costo con tecnología IoT en Colombia, realizando una integración de los análisis sobre los resultados estadísticos soportados con las fuentes de información oficiales del Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB). Adicionalmente, está soportado por los informes técnicos y operativos, consultas a los expertos y percepción de la sociedad para su aplicación en un contexto real.

Los aportes de Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018) relacionados sobre el enfoque mixto se ven reflejados en la naturaleza de los datos consultados aplicando diversas técnicas e instrumentos para la recolección de información y la consulta de las fuentes de datos de origen cuantitativo, lo que permitió el desarrollo de una triangulación de la información y así fortalecer la validez del estudio.

La literatura consultada en los artículos científicos de Kumar et al. (2015) y León Salas & José Alejandro (2024), indican que los sensores de bajo costo para la medición de variables ambientales son elementos con un gran potencial como sistemas indicativos para el uso dentro de proyectos que pueden articularse con los sistemas oficiales de cada país, sin embargo, estos sensores requieren de distintas estrategias para la validación de la información, como el mantenimiento periódico, calibración con sensores patrones o fuentes con sistemas oficiales con equipos certificados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y finalmente las consideraciones éticas que puedan estar relacionadas con la gestión y uso de los datos. Estos hallazgos se corroboran en los análisis de los datos de las estaciones de bajo costo ofrecidos por el proyecto Índice Mundial de Calidad del Aire (aqicn) de las estaciones como Las Ferias, Santa Elena, Puente Aranda y Tanques la Ye.

3.7.3. Implicaciones territoriales y proyectivas

La investigación evidencia vacío crítico en el acceso y confiabilidad de los datos ambientales de estaciones IoT de bajo costo en instituciones educativas, particularmente en zonas intermedias y rurales en donde las instituciones no tienen una estación cercana de

monitoreo de variables ambientales de fuentes oficiales. Asimismo, en el mejor de los casos los recursos solo alcanzan para la implementación de una estación IoT de bajo costo y no cuentan con la opción para acceder a equipos patrones para calibrar los sensores de bajo costo.

Las estaciones IoT, si bien presentan limitaciones tanto en la confiabilidad de los datos debido a la naturaleza de los sensores de bajo costo, permiten iniciar procesos de medición de variables ambientales enfocados al monitoreo ambiental colaborativo, que es accesible casi por cualquier persona y fomenta la educación y el desarrollo de proyectos similares. Por otra parte, El desarrollo y aplicación de proyectos con tecnología IoT, abre la puerta para realizar un acercamiento con las autoridades ambientales territoriales como Cormacarena con el fin de recibir asesoramiento, potenciar la confiabilidad de los datos, y lo más importante, poder apoyar los proyectos oficiales de este ente territorial de orden ambiental.

El trabajo de campo, apoyado con las entrevistas a los expertos y la evidencia empírica aportan conocimientos importantes que pueden servir para la formulación de políticas internas o externas en distintas instituciones en torno a la aplicación de tecnologías IoT para el monitoreo y vigilancia de la calidad del aire. Adicionalmente, puede ser un referente en la aplicación de este tipo de tecnologías enfocado a otros campos de acción.

4. Capítulo IV: Propuesta de Transformación

El presente capítulo presenta el desarrollo de la propuesta de transformación derivada del análisis teórico y empírico realizado en el marco de esta investigación.

A partir de los hallazgos obtenidos mediante la implementación de distintos instrumentos como las encuestas, entrevistas, guías de observación y el análisis comparativo de datos provenientes de estaciones IoT de bajo costo de la red aqicn y estaciones oficiales de calidad del aire de la red RMCAB y SISAIRES se plantea la estructuración de la propuesta de transformación.

El desarrollo de la metodología integral busca optimizar el uso, confiabilidad de los datos y la sostenibilidad de estaciones de monitoreo con tecnologías IoT en contextos educativos colombianos. Esta propuesta se alinea y da respuesta al objetivo general propuesto de la tesis y se construye desde la interdisciplinariedad, con un enfoque propositivo y contextualizado, y tiene el principal propósito de ofrecer una solución accesible, escalable, replicable y socialmente pertinente ante los diferentes retos y oportunidades identificados en la gestión de la calidad del aire en instituciones públicas y privadas estudiadas. La estructura del capítulo se compone iniciando con la fundamentación conceptual de la propuesta de transformación, su composición técnica, estructural y metodológica, y los mecanismos propuestos para su evaluación, validación y seguimiento.

4.1. Fundamentación de la propuesta de transformación.

La propuesta de transformación metodológica que se presenta en esta tesis se fundamenta en los hallazgos que se han obtenido en el desarrollo de esta investigación. Adicionalmente, se construye a partir de una fundamentación teórica previamente comprobada, al cual se le incorporan nuevos aportes que ayudan a brindar soluciones al problema en el contexto colombiano. De este modo, se toma como punto de partida los diferentes conceptos del marco conceptual basados principalmente en la sostenibilidad ambiental, la aplicación de la tecnología IoT en contextos ambientales, la calidad del aire, y la educación ambiental desde una mirada multidisciplinar que permite la formación de actores críticos y responsables con su entorno. A lo largo del trabajo, estos fundamentos han sido contextualizados y adaptados de acuerdo con las necesidades encontradas mediante el diagnóstico y el análisis de datos, particularmente en instituciones educativas públicas y privadas con limitaciones técnicas y operativas.

Tal como se ilustró en el marco referencial, se asumió inicialmente que la adopción de las tecnologías emergentes como el IoT en contextos educativos puede llegar a facilitar el acceso a información ambiental en tiempo real con pocos recursos y a un bajo costo. Sin embargo, los resultados obtenidos mostraron que dicha incorporación está limitada por distintos factores propios de cada institución, como por ejemplo, factores estructurales, organizacionales e incluso pedagógicos que requieren de una intervención metodológica integral. A partir de estos hallazgos, se redefine la forma en que la tecnología debe ser abordada e introducida gradualmente en los procesos educativos y de gestión ambiental, destacando la necesidad del desarrollo de protocolos específicos para su instalación, validación, sostenibilidad y uso en entornos educativos.

Esta propuesta, por tanto, llega más allá de una investigación teórica clásica al plantear un modelo metodológico que integra la tecnología IoT con procesos de formación sustentados en contextos académicos, con apropiación comunitaria, gestión operativa y evaluación sistemática, que incentiva a la participación de actores de toda la comunidad dentro de un contexto. Se introduce como contribución teórica la articulación entre monitoreo ambiental, ciencia ciudadana, sostenibilidad operativa y educación crítica en contextos con recursos limitados. Esta asociación requiere nuevas formas de usar, analizar y adoptar la información y las tecnologías. Las estaciones de monitoreo ya no son solamente un hardware que mide variables, sino herramientas de transformación pedagógica y ambiental que están a disposición de la comunidad. En este sentido, el modelo propuesto amplía las rutas teóricas sobre el uso del IoT en educación ambiental, al proponer una serie de pasos lógicos en su implementación que considera tanto la infraestructura técnica como el componente formativo e institucional.

Así, el diseño de la propuesta metodológica responde de manera directa al objetivo general de esta tesis, en tanto busca optimizar el uso eficiente de estaciones IoT de bajo costo de monitoreo ambiental que se pueden diseñar por los mismos actores de las instituciones educativas, con base en la producción de conocimiento útil, práctico y contextualizado en aras del desarrollo de nuevo conocimiento. Al adoptar un enfoque propositivo-aplicado, se establece una hoja de ruta hacia la transformación y que integra los resultados empíricos, los fundamentos teóricos y la contribución original del investigador, expresada en una metodología adaptable, escalable y sostenible.

Este proceso da lugar a una propuesta innovadora que no solo se limita a replicar modelos existentes comprobados, sino que propone nuevas formas de entender la gestión ambiental educativa desde una perspectiva tecnológica, interdisciplinaria y contextual. El investigador, desde su campo de acción, aporta con esta propuesta una metodología que puede ser replicada en diversas instituciones con apenas ligeras modificaciones, lo que motiva a las instituciones al desarrollo y respuesta de las capacidades de las instituciones locales en temas de monitoreo ambiental, al fortalecimiento de políticas de sostenibilidad institucional, y a la consolidación de comunidades educativas más informadas y comprometidas con el entorno.

4.2. Estructura de la propuesta de transformación.

Metodología integral para el uso eficiente y sostenible de estaciones IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas colombianas.

Esta propuesta busca diseñar una metodología para gestionar las estaciones IoT de bajo costo de manera eficiente y sostenible, principalmente en el monitoreo de la calidad del aire en instituciones educativas colombianas. Adicionalmente, surge como respuesta a las necesidades identificadas en el contexto educativo, ambiental y tecnológico del país, en especial en la implementación de las instituciones tanto públicas como privadas que han demostrado interés en la gestión ambiental, sin embargo, carecen de estrategias, desarrollos y proyectos claros y estructurados que permitan el aprovechamiento de este tipo de tecnologías emergentes como el Internet de las Cosas (IoT) en el monitoreo, gestión y recolección de información para la vigilancia de la calidad del aire en sus instalaciones.

Por otra parte, la propuesta de transformación se enmarca en concordancia con los postulados de Hernández Sampieri & Mendoza Torres (2018), en donde estos autores proponen que la investigación aplicada busca transformar las realidades mediante soluciones contextualizadas y sustentadas. Así mismo, autores como Gallardo et al. (2020) reconocen el impacto de la aplicación de proyectos con tecnologías emergentes como el Internet de las cosas IoT y su impacto en la educación, permitiendo la implementación en diferentes contextos educativos con el fin de recolectar información y proponer soluciones que estén al alcance de la comunidad académica.

Objetivo general de la propuesta

Diseñar una metodología integral para el uso eficiente, validado y sostenible de estaciones IoT de bajo costo, orientada al monitoreo de variables de calidad del aire en instituciones educativas colombianas, y su articulación con redes colaborativas y políticas de gestión ambiental institucional.

Objetivos Específicos

- Estandarizar procedimientos técnicos para la instalación, calibración y mantenimiento de estaciones IoT de bajo costo.
- Establecer un modelo de análisis comparativo de datos ambientales entre estaciones IoT y estaciones acreditadas.
- Proponer lineamientos metodológicos para la validación operativa de los datos recolectados.
- Fortalecer las capacidades institucionales mediante procesos de formación y apropiación tecnológica.
- Establecer una red piloto de monitoreo ambiental colaborativo entre instituciones educativas.
- Promover el uso educativo y participativo de los datos para fomentar conciencia ambiental.

Representación teórica y práctica de la propuesta

Una vez terminada la etapa del análisis de la información y revisados los hallazgos obtenidos en esta investigación, contratadas con las estaciones de monitoreo de bajo costo IoT y las estaciones oficiales, se ha logrado establecer que para desarrollar la metodología integral aplicada a las estaciones IoT de bajo costo, es necesario abordar los siguientes campos de acción:

Figura 36.
Esquema funcional de la propuesta de transformación.



Nota: Representación gráfica de los campos de acción de la propuesta de transformación.

Fuente: El autor.

Fases y etapas de implementación:

Tabla 25.

Fases de la metodología.

Fase	Descripción
Fase 1 – Diagnóstico institucional	En esta fase se hace necesario hacer un reconocimiento e identificación de las condiciones técnicas y educativas para la instalación de estaciones IoT.
Fase 2 – Implementación Técnica	Para llevar a cabo la implementación de esta fase y previa identificación de las condiciones técnicas se debe realizar la instalación, calibración y puesta en marcha de las estaciones.
Fase 3 – Formación y apropiación	La implementación de esta fase es fundamental para que la comunidad educativa pueda hacer uso de la información, para ello se realizarán talleres con docentes, estudiantes y administrativos sobre el monitoreo ambiental y uso de datos.
Fase 4 – Validación y Análisis	En esta fase se realizará la comparación con los datos disponibles de estaciones oficiales, se revisarán si existen errores en la lectura de sensores o envío de información y finalmente se realizarán los ajustes en la lectura de los sensores.
Fase 5 – Socialización y red colaborativa	Esta fase permitirá el trabajo en red con otras instituciones, para ello se debe hacer un escenario o plataforma para compartir datos y experiencias con otras instituciones educativas, con el fin de conformar e ir consolidando la red de monitoreo.

Fase 6 – Evaluación y mejora continua	Esta etapa es la de realimentación, en donde se evaluarán los indicadores y el escalamiento.
--	--

Nota: En la tabla se presentan cada una de las etapas que se deben implementar en la metodología. Fuente: el autor.

Fase 1 – Diagnóstico Institucional

Objetivo de la fase

Realizar el reconocimiento de las condiciones técnicas, geográficas, ambientales y pedagógicas de la institución educativa, con el fin de establecer la viabilidad de la implementación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire adoptando tecnologías IoT.

Actividades de la Fase 1

Para realizar el diagnóstico institucional se hace necesario tener en cuenta en primera medida la ubicación geográfica de la institución puesto que de acuerdo con esta ubicación se valorará las variables ambientales importantes para su medición y análisis. Adicionalmente, es necesario verificar si la institución cuenta con el servicio de conexión a internet y si tiene cobertura Wi-Fi, esto permitirá hacer un diagnóstico preliminar para la elección del Hardware para la conexión a internet, que para este caso podría ser por Wifi o por conexión móvil por medio de la red 4G o 5G (tecnología de comunicación de los teléfonos móviles inteligentes). A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 26.
Acciones vinculadas a la Fase 1.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Visita técnica preliminar	Reunión de reconocimiento institucional con los actores interesados directivos, administrativos y comunidad académica para explicar el proyecto, realizar la recopilación de los datos y obtener la aprobación de todos los interesados.	Coordinador del proyecto / Directivo.	Registro de visita y acta.

2	Levantamiento de condiciones de conectividad	Evaluar si la institución cuenta con red Wi-Fi estable y cobertura en la zona propuesta de instalación. Si no existe cobertura en el lugar o no hay conexión a internet, definir la necesidad de Tarjetas IoT con módulos con tarjeta SIM o adquirir Router con tarjeta SIM.	Técnico IoT / Encargado TIC.	Informe técnico de conectividad.
3	Revisión de infraestructura eléctrica	Verificar e inspeccionar la disponibilidad de puntos de energía seguros y protegidos contra lluvia o humedad.	Técnico de soporte.	Lista de chequeo eléctrico.
4	Diagnóstico de ubicación geográfica	Realizar la evaluación de la zona: Urbana o rural y posibles fuentes de contaminación atmosférica cercanas (vehicular, agrícola, industrial).	Coordinador ambiental.	Mapa georreferenciado e informe.
5	Identificación de variables críticas a monitorear	Según la ubicación, definir qué contaminantes son prioritarios: PM _{2.5} en zonas urbanas, NH ₃ en zonas rurales, CO ₂ en espacios cerrados, entre otros.	Técnico ambiental / Investigador.	Lista priorizada de variables.
6	Diagnóstico educativo y pedagógico	Identificar si existe interés institucional en procesos de formación ambiental e integración curricular.	Docente líder o coordinador académico.	Formato diagnóstico pedagógico.
7	Consolidación del diagnóstico	Documentar toda la información en una ficha técnica institucional para decidir si es viable o no la instalación de la estación IoT.	Coordinador del proyecto.	Informe consolidado y decisión.

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 1. Fuente: el autor.

Para dar cumplimiento con las acciones asociadas a la fase 1, se ha construido una ficha de diagnóstico institucional para la instalación de la estación IoT.

Tabla 27.

Ficha de diagnóstico para la instalación de Estación IoT.

Datos Generales	Nombre de la institución		
	Dirección:		Correo:
	Nombre del contacto institucional:		
Categoría	Ítem	Información requerida	Observaciones
Conectividad	¿Cuenta con red Wi-Fi?	Si / No	¿Cobertura total? ¿Contraseña disponible?
	¿Dispone de red móvil (4G o 5G)?	Listado de operadores con cobertura en la zona	Nivel de señal en dBm
Energía	¿Hay tomacorrientes disponibles?	Si / No	¿A prueba de agua? ¿Interior o exterior?
Ubicación	Zona	Urbana / Rural / Mixta	
	Fuentes de emisión cercanas	Tráfico / Industria / Cultivos / Basurero / Otro	
Variables sugeridas a monitorear	PM _{2.5}	✓ / ✗	Según nivel de contaminación vehicular o cercanía de zona industrial.
	PM ₁₀	✓ / ✗	Según nivel de contaminación vehicular o cercanía de zona industrial.
	CO ₂	✓ / ✗	Espacios cerrados con poca ventilación.
	NO ₂	✓ / ✗	Alta circulación vehicular.
	O ₃	✓ / ✗	En áreas urbanas con alta radiación solar.
	NH ₃	✓ / ✗	Zonas rurales con actividad ganadera.
Infraestructura educativa	¿Cuenta con proyectos ambientales escolares (PRAE)?	Si / No	¿Articulado al PEI?

	¿Tiene asignaturas o electivas ambientales?	Si / No	Grados involucrados
	¿Cuenta con docentes capacitados en temas ambientales o IoT?	Si / No	Nombre y perfil profesional
Nombre y Firma Técnico responsable			
Nombre y Firma del representante de la institución			

Nota: En la tabla anterior se presenta la ficha de diagnóstico que se debe aplicar a la institución educativa antes de la instalación de la estación de monitoreo IoT. Fuente: el autor.

Con el fin de tener un orden en el diligenciamiento de la ficha de diagnóstico se emiten las siguientes consideraciones:

- La ficha debe ser completada durante una visita presencial o virtual con acompañamiento del personal institucional.
- Se debe garantizar la veracidad de los datos mediante evidencia fotográfica o documental cuando sea posible.
- La ficha debe ser firmada por el técnico responsable y un representante de la institución.
- Los ítems marcados con X indican alertas que podrían limitar o aplazar la instalación, y deben analizarse en conjunto.

Fase 2 – Implementación Técnica

Objetivo de la fase

Ejecutar la instalación, calibración inicial y puesta en marcha de las estaciones IoT de acuerdo con las variables seleccionadas para el monitoreo de calidad del aire, garantizando el cumplimiento de los requisitos técnicos mínimos y la funcionalidad operativa del sistema de transmisión de datos.

Actividades de la Fase 2

Para realizar la implementación técnica es importante haber realizado la fase 1. A partir de ella, se realizaría la elección del hardware (Kit de estación y sensores) la programación del sistema embebido y la instalación física del Sistema (estación de monitoreo). Así mismo, se debe

realizar una calibración inicial de los sensores, la prueba de conectividad y transmisión de la información de cada variable, y finalmente, realizar la prueba de funcionamiento y estabilidad con el fin de elaborar el Acta de la puesta en marcha de la estación IoT de bajo costo. A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 28.
Acciones vinculadas a la Fase 2.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Preparación del kit de instalación	Revisión del material requerido: sensores, Tarjeta IoT, fuente de alimentación, carcasa, módulo Wi-Fi o SIM, soportes, cableado.	Técnico de soporte / Coordinador del proyecto	Lista de chequeo de instalación completo
2	Configuración previa de la Tarjeta IoT	Cargar el Sketch al microcontrolador (ESP32, Wemos D1 Mini o similar), asegurando conectividad con red Wi-Fi o datos móviles y plataforma en la nube.	Técnico IoT / Programador	Tarjeta IoT pre configurado y probado
3	Instalación física de la estación	Ubicación del dispositivo en un lugar seguro, ventilado, con buena señal y protegido de la intemperie; instalación del soporte y conexiones.	Equipo técnico / Apoyo institucional	Estación IoT físicamente instalada
4	Calibración inicial de sensores	Verificación de funcionamiento individual de sensores (PM _{2.5} , PM ₁₀ CO ₂ , NO ₂ , O ₃ , NH ₃), y ajuste frente a una estación oficial cercana si es posible.	Técnico ambiental / Analista	Informe de calibración inicial
5	Verificación de transmisión de datos	Verificar que la estación transmita datos en tiempo real o en intervalos definidos hacia la nube (ThingSpeak, Ubidots,	Técnico IoT	Registro de conexión activa y monitoreo exitoso

		Thingier.io, Adafruit.io etc.)		
6	Prueba de funcionamiento y estabilidad	Monitoreo por al menos 72 horas continuas para detectar errores, interrupciones o fallas de conectividad/lectura.	Técnico / Coordinador del piloto	Registro de datos y ajustes necesarios
7	Elaboración del acta de puesta en marcha	Documento firmado por los responsables técnicos e institucionales certificando la instalación y funcionamiento exitoso.	Coordinador del proyecto / Institución educativa	Acta de instalación y entrega de estación

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 2. Fuente: el autor.

Con el fin de realizar la documentación de manera clara y ordenada de la fase 2, se ha construido una lista de chequeo de verificación técnica para la implementación.

Tabla 29.

Lista de chequeo de verificación técnica para la implementación.

Categoría	Ítem	Cumple (✓/X)	Observaciones
Conectividad	Configuración de red Wi-Fi/SIM realizada		
	Verificación de conexión en nube		
Sensores	Sensor PM _{2,5} y PM ₁₀ instalado y operativo		
	Sensor CO ₂ instalado y operativo		
	Sensor NO ₂ /O ₃ /NH ₃ instalado (según necesidades)		
Seguridad y protección	Caja estanca colocada correctamente		
	Cableado seguro y con aislación adecuada		
Energía	Fuente de poder conectada y estable		
Funcionamiento	Lectura activa en plataforma en la nube		
	Datos se actualizan cada 5-10 minutos		

	Sensores funcionando		
Validación y entrega	Calibración inicial frente a estación oficial		
	Acta de entrega firmada		
Nombre y Firma Técnico responsable			
Nombre y Firma del representante de la institución			

Nota: En la tabla anterior se presenta la lista de chequeo técnico que se debe realizar para la instalación de la estación IoT. Fuente: el autor.

Fase 3 – Formación y apropiación

Objetivo de la fase

Capacitar a docentes, estudiantes y personal administrativo de las instituciones educativas en el uso, interpretación y aprovechamiento de los datos ambientales generados por las estaciones IoT, promoviendo la apropiación tecnológica y el fortalecimiento de la conciencia ambiental.

Actividades de la Fase 3

Para realizar la formación y apropiación de la comunidad de las instituciones académicas es importante realizar un diseño de contenidos informáticos y realizar una planificación de talleres ya sea de manera presencial o virtual con el fin de capacitar a toda la comunidad interesada, de esta forma se puede llegar a asegurar que los datos obtenidos de la estación de bajo costo IoT podrán tener una utilidad dentro de la institución encaminadas a la formulación de políticas institucionales internas. A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 30.

Acciones vinculadas a la Fase 3.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Diseño de contenidos formativos	Elaboración de módulos educativos sobre calidad del aire, sensores IoT, análisis de datos y sostenibilidad.	Coordinador pedagógico / Especialista ambiental	Manuales y presentaciones digitales

2	Planificación de talleres	Programación de sesiones para públicos (docentes, estudiantes, administrativos), definición de fechas y espacios.	Coordinador institucional	Cronograma de formación validado
3	Desarrollo de talleres presenciales	Ejecución de jornadas teóricas y prácticas sobre uso de estaciones y análisis básico de datos.	Facilitador IoT / Docente líder	Registro fotográfico y listas de asistencia
4	Ejercicios prácticos con los datos	Uso de plataformas como Excel, Power Bi o Google Sheets para graficar y analizar datos reales recolectados por la estación.	Docente guía / Estudiantes	Informes y gráficos generados por estudiantes
5	Evaluación del proceso formativo	Aplicación de encuestas o rúbricas para medir comprensión, interés y capacidades desarrolladas.	Coordinador académico	Informe de evaluación y retroalimentación
6	Generación de propuestas estudiantiles	Estímulo a la creación de campañas, proyectos o iniciativas escolares basadas en los datos monitoreados.	Estudiantes / Asesores	Proyectos estudiantiles vinculados al PRAE

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 3. Fuente: el autor.

Con el fin de realizar la formación a la comunidad académica, se ha construido un formato de seguimiento a talleres de formación.

Tabla 31.

Formato de seguimiento a talleres de formación.

Categoría	Ítem	Descripción	Evidencia requerida
Contenido	Tema tratado	Calidad del aire, IoT, lectura de sensores, análisis de datos.	Presentación en Power Point o similar
Participación	Público	Docentes / Estudiantes / Administrativos	Lista de asistencia firmada
Duración	Tiempo del taller	En horas o número de sesiones	Acta del evento

Metodología	Tipo de actividad	Charla, práctica con datos, trabajo colaborativo	Fotografías / capturas de pantalla
Resultados	Productos generados	Gráficas, informes, proyectos escolares	Portafolio o repositorio

Nota: En la tabla anterior se presentan los ítems necesarios para hacer el seguimiento a los talleres de formación. Fuente: el autor.

Fase 4 – Validación y Análisis

Objetivo de la fase

Evaluar la confiabilidad, precisión y funcionalidad operativa de las estaciones IoT de bajo costo mediante el análisis comparativo de los datos recolectados con los de estaciones acreditadas, y establecer la utilidad de la información para la toma de decisiones ambientales institucionales.

Actividades de la Fase 4

Para realizar la validación y análisis de la información proporcionada por las estaciones IoT de bajo costo es necesario tener una recopilación de datos históricos tanto de la estación IoT como las estaciones acreditadas para realizar una comparativa de los datos y verificar si existen diferencias entre ambas estaciones. Por otra parte, esto permite tener una base comparativa para realizar acciones de calibración periódica de las estaciones. A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 32.

Acciones vinculadas a la Fase 4.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Recolección de datos históricos	Consolidar los datos obtenidos por las estaciones IoT durante un período mínimo de 3 meses.	Docente líder del proyecto	Base de datos consolidada
2	Comparación con estaciones acreditadas	Obtener datos comparables de estaciones IDEAM/SISAIRE/RMCAB cercanas y realizar análisis correlacional.	Analista de datos (Docente Capacitado)	Informe comparativo y gráficos
3	Evaluación de calidad de datos	Revisar frecuencia, consistencia, valores atípicos y márgenes de error de los sensores IoT.	Investigador principal y/o estudiantes	Matriz de validación técnica

4	Evaluación funcional del sistema	Verificar conectividad, fallos, porcentaje de pérdida de datos y tiempos de respuesta del sistema.	Investigador principal o Coordinador	Informe de desempeño operativo
5	Análisis de utilidad en la gestión institucional	Aplicación de entrevistas o encuestas a directivos sobre el uso real de la información para la toma de decisiones.	Investigador o Coordinador pedagógico	Registro de percepción institucional
6	Retroalimentación	Consolidar hallazgos para ajustar sensores, frecuencias de envío o estrategias educativas.	Docente líder de proyecto	Acta de retroalimentación con acciones correctivas

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 4. Fuente: el autor.

En esta fase, se ha realizado una matriz de validación de datos y análisis comparativo para verificar el funcionamiento de la estación IoT de bajo costo comparada con las estaciones de fuentes oficiales.

Tabla 33.

Matriz de validación y análisis comparativo.

Variable	Estación IoT	Estación Acreditada	Desviación (%)	Correlación (R ²)	Cumple criterio técnico (✓/✗)
PM2.5	18.4 µg/m ³	20.1 µg/m ³	8.46%	0.91	✓
CO2	412 ppm	405 ppm	1.73%	0.89	✓
NO2	34 ppb	37 ppb	8.11%	0.85	✓

Nota: En la tabla se muestra un ejemplo de distintas variables para validar la calidad de los datos en comparación con una fuente oficial. Fuente: el autor.

Instrucciones para la validación

Con el fin de validar los datos de las estaciones IoT de bajo costo en comparación con las estaciones de las fuentes oficiales se hace necesario tener un histórico de datos de ambas estaciones en el mismo periodo y la misma cantidad de datos, lo ideal sería analizar el conjunto de datos históricos de una semana o un mes para que sea una muestra representativa. A continuación, se enumeran una serie de pasos sugeridos para aplicar la matriz de validación.

- Se sugiere tomar al menos 30 datos coincidentes en tiempo y periodo entre la estación IoT y la oficial para comparar.

- Utilizar funciones estadísticas en hojas de cálculo para calcular promedios, desviación estándar, error porcentual y coeficiente de correlación (Pearson).
- Considerar como válida una desviación menor al 15% y un R^2 mayor a 0.8 para fines educativos, académicos y/u operativos.
- Las observaciones deben consignarse en un informe acompañado de gráficos comparativos.

Nota: En el **anexo B** Datos de las estaciones de monitoreo de Calidad del aire, se encuentra un análisis comparativo de los datos y aplicación de desviación estándar y de coeficientes de correlación en Excel con sus respectivas fórmulas que pueden ser adaptados para esta metodología.

Fase 5 – Socialización y red colaborativa

Objetivo de la Fase

Divulgar los resultados obtenidos por las estaciones de monitoreo de calidad del aire dentro de la comunidad educativa y fomentar la participación en red entre diversas instituciones educativas para fortalecer el monitoreo y el trabajo colaborativo.

Actividades de la Fase 5

Con el fin de tener una participación de más instituciones y fomentar el trabajo en Red con las comunidades educativas, se es indispensable la construcción y diseño de materiales asociados a la divulgación, y compartir las experiencias a través de publicaciones de los resultados, ya sean en las plataformas institucionales o una plataforma desarrollada en conjunto para cumplir esta labor. Finalmente, es importante gestionar un convenio de cooperación interinstitucional entre las instituciones para comprometer a todos los actores. A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 34.

Acciones vinculadas a la Fase 5.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Diseño de materiales de divulgación	Elaborar materiales de divulgación como infografías, videos y documentos con lenguaje claro y visual atractivo sobre los hallazgos.	Docente del área de ciencias	Flyer o video

2	Presentación de resultados en la comunidad	Convocar a jornadas institucionales para compartir los resultados con estudiantes, docentes, padres y directivos.	Líder del proyecto	Actas de socialización de resultados
3	Publicación de resultados en plataformas virtuales	Descargar los resultados históricos de plataformas como ThingSpeak, y publicarlos en la página web de la institución, redes sociales educativas.	Responsable de las TICs en la institución educativa	Enlaces de acceso público a resultados
4	Establecimiento de red institucional de sensores	Contactar a otras instituciones con el fin de compartir experiencias e incentivarlos para formar una red colaborativa de monitoreo escolar.	Coordinador de la institución	Convenios firmados entre las instituciones
5	Estrategias de colaboración interinstitucional	Proponer diversos encuentros como foros, hackatones o ferias académicas para fortalecer el intercambio de datos y proyectos.	Comité académico de las instituciones educativas	Creación de la red colaborativa.

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 5. Fuente: el autor.

Para desarrollar la estrategia de socialización y de trabajo en red de esta fase, se ha desarrollado un plan de socialización y colaboración institucional, que permitirá tener una hoja de ruta a seguir para concretar el trabajo en red entre las instituciones.

Tabla 35.

Plan de socialización y colaboración interinstitucional.

Actividad	Público objetivo	Medio de difusión	Frecuencia	Responsable
Boletín ambiental mensual	Comunidad educativa	Correo / Cartelera / PDF digital / Página web	Mensual	Docente líder PRAE
Feria ambiental interinstitucional	Estudiantes y docentes de red educativa	Evento presencial o virtual	Anual	Coordinador ambiental

Videos educativos con datos reales	Estudiantes / Padres	Redes sociales, YouTube, entre otras	Trimestral	Comunicador institucional
Reuniones de red de sensores escolares	Instituciones educativas participantes	Google Meet o Presencial	Bimensual	Coordinador del proyecto

Nota: En la tabla se muestra una serie de estrategias que pueden ser aplicadas a la socialización de los resultados obtenidos de las estaciones IoT. Fuente: el autor.

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones útiles que son de gran ayuda a la hora de socializar los resultados a toda la comunidad académica:

- El lenguaje y la redacción de textos se debe adaptar al público: se recomienda no utilizar datos técnicos específicos y usar recursos gráficos.
- Se debe permitir retroalimentación por parte de la comunidad a través de encuestas, formularios o medios digitales.
- La red colaborativa debe tener objetivos comunes, reuniones periódicas y responsables definidos.
- La socialización debe integrarse al calendario académico y a los proyectos institucionales (PRAE, PEI o similares).

Fase 6 – Evaluación y mejora continua

Objetivo de la fase

Monitorear el desempeño técnico, pedagógico y comunitario de la propuesta metodológica para asegurar su sostenibilidad, replicabilidad y mejora continua, mediante procesos de evaluación participativa de las comunidades y el análisis de resultados.

Actividades de la Fase 6

Para desarrollar una gestión de la mejora continua por parte de las instituciones en el desarrollo de proyectos asociados con las estaciones de monitoreo de calidad del aire y variables ambientales, es indispensable hacer un plan de evaluación acompañado de herramientas de seguimiento, con el fin de realizar los ajustes pertinentes en aras de crear acciones de mejora para las instituciones en los procesos de gestión y administración de las estaciones IoT. A continuación, se muestra los pasos que se deben desarrollar en esta fase con su respectiva descripción:

Tabla 36.
Acciones vinculadas a la Fase 6.

Paso	Acción	Descripción	Responsable	Producto esperado
1	Diseñar el plan de evaluación	Elaboración de los indicadores y criterios para evaluarlos componentes de la propuesta desde el punto de vista técnico, educativo y comunitario.	Líder del proyecto / Investigador	Plan de evaluación
2	Aplicación de herramientas de seguimiento	Encuestas, entrevistas, guías de observación y rúbricas para evaluar uso, apropiación y desempeño del sistema.	Docentes y estudiantes	Diligenciamiento de los formatos estandarizados
3	Análisis de los resultados de evaluación	Interpretación de la información para identificar aciertos, dificultades y oportunidades de mejora.	Investigador principal	Informe de la evaluación
4	Revisión técnica periódica	Validación y verificación del estado operativo de los sensores, conectividad, calibración y flujo de datos en periodos no mayor a tres meses.	Responsable de las TIC o Líder del proyecto	Informe técnico trimestral
5	Socialización de mejoras y realimentación	Presentación de las modificaciones y ajustes a la comunidad educativa y validación de los cambios propuestos.	Comité del proyecto	Acta de realimentación y validación

Nota: Pasos ordenados para la ejecución de acciones de la fase 6. Fuente: el autor.

Con la finalidad de realizar la evaluación del proceso y generar acciones de mejora en todos los procesos asociados con el funcionamiento de la estación de monitoreo de calidad del aire y variables ambientales se propone el desarrollo de una matriz de evaluación y mejora continua.

Tabla 37.
Matriz de evaluación y mejora continua.

Dimensión	Indicador	Método de recolección	Periodicidad	Responsable
Técnica	Estación operativa sin fallos mayor al 90% del tiempo de operación	Registro técnico	Trimestral	Docente capacitado en IoT
Educativa	% de docentes que usan los datos en clase	Encuesta / entrevistas	Semestral	Coordinador académico
Comunitaria	Percepción de utilidad por parte de la comunidad	Encuestas / formulario en línea	Anual	Docente líder
Sostenibilidad	Operatividad del sistema sin intervención externa	Observación / entrevistas	Anual	Integrantes del proyecto

Nota: En la tabla se muestra una serie de indicadores que deberían ser aplicados para que se desarrolle una evaluación objetiva del proyecto. Fuente: el autor.

A continuación, se presentan las recomendaciones a seguir para aplicar correctamente la matriz de evaluación y mejora continua.

- Las herramientas e instrumentos deben estar alineadas con los objetivos específicos de la propuesta.
- La evaluación debe ser participativa: deben involucrarse todos los actores institucionales y técnicos.
- El informe de evaluación debe alimentar el ciclo de mejora continua e integrarse en el proyecto educativo institucional.
- Los ajustes deben registrarse y documentarse para facilitar la replicabilidad del modelo.

4.3. Valoración/ evaluación / validación de la propuesta de transformación.

La evaluación de la propuesta metodológica que se diseñó para el aprovechamiento de estaciones IoT de bajo costo en el monitoreo de calidad del aire se fundamenta bajo un enfoque

integral que incluye la aplicación de métodos científicos, criterios estructurados y validación empírica con especialistas. Esta evaluación se estructura en la tríada de los siguientes componentes esenciales: criterios de validación, indicadores evaluativos y metodología de consulta experta (Delphi).

Indicadores, criterios y productos vinculados a los objetivos y fases

Tabla 38.

Indicadores, criterios y productos vinculados a los objetivos y fases.

Fase	Indicador	Criterio de evaluación	Producto esperado
Diagnóstico institucional	Identificación de condiciones técnicas y pedagógicas	Amplia información y confiabilidad sobre conectividad, energía, ubicación, interés pedagógico	Ficha institucional completa y validada
Implementación técnica	Operatividad de la estación IoT instalada en la institución	Lecturas válidas, transmisión estable y puesta a punto inicial efectiva	Estación instalada y funcional
Formación y apropiación	Nivel de comprensión y utilidad de los datos ambientales y de calidad del aire.	Participación en talleres, uso útil y educativo de los datos, integración con el currículo académico	Evidencia de formación y adopción en las actividades pedagógicas
Validación y análisis	Comparación de datos de las estaciones IoT con estaciones oficiales	Margen de error inferior al 15% y correlación mayor a 0.8	Informe técnico validado
Socialización y red colaborativa	Alcance, cobertura y circulación de la información ambiental interinstitucional	Difusión en medios institucionales, páginas web del proyecto, formación de redes educativas	Red de colaboración activa
Evaluación y mejora continua	Ajustes derivados de evaluación participativa de la comunidad académica.	Registro de las mejoras metodológicas y sostenibilidad del sistema en el tiempo	Documento de ajuste hacia la mejora continua

Nota: En la tabla se listan los productos esperados en cada fase de ejecución. Fuente: el autor.

Recursos necesarios para la aplicación de la propuesta

- Recursos humanos: Coordinador del proyecto, técnicos IoT, docentes líderes, estudiantes, comunidad educativa, expertos evaluadores.
- Recursos materiales: Sistemas embebidos (Tarjetas de IoT) para el desarrollo de las Estaciones IoT, sensores de bajo costo (PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, NO₂, etc.), herramientas de instalación, conexión a internet, computadores, entre otros.
- Recursos digitales en línea o fuera de línea: Plataforma de monitoreo (ThingSpeak, Ubidots, thinger.io, adafruit.io), hojas de cálculo, software de análisis básico y avanzado como Power Bi.
- Recursos pedagógicos: Manuales, Tutoriales, videotutoriales presentaciones, rúbricas, fichas de seguimiento, guías de talleres, infografías.
- Tiempo estimado: 6 meses de implementación piloto.

Validación de la propuesta mediante el método Delphi

Para realizar la validación de la propuesta de transformación en cuanto a su pertinencia científica se aplicó el método Delphi, Para ello se contó con la participación de 3 expertos en áreas de calidad el aire, aplicación de proyectos con IoT y Gestión en la educación. Para la aplicación del método se contemplaron 3 rondas que se presentan a continuación.

1. Selección de expertos: Se identificaron y convocaron a 4 expertos profesionales con al menos 5 años de experiencia en el campo, sin embargo 3 ellos aceptaron participar del proceso de validación.

Tabla 39.
Perfiles de los expertos validadores de la propuesta.

Nombres y Apellidos	Grado académico	Profesión base	Ocupación	Años de experiencia
Juan Alejandro Chica García	Magister en Ingeniería con énfasis en energías	Ingeniero Electrónico	Docente Investigador en Educación Superior	12 años en proyectos en el área y 17 años en docencia universitaria.
John Alejandro Figueredo Luna	Maestría en Educación en Línea. Maestría en gestión de tecnologías de la información (e)	Ingeniero de Sistemas	Docente Investigador en Educación Superior	9 años de experiencia en proyectos de Investigación y 18 años en docencia universitaria.
Ányelo Gerley Quintero Reyes	Maestría en Educación en Línea.	Ingeniero de Sistemas	Docente Investigador en Educación Superior	9 años de experiencia en proyectos de Investigación y 24 años en docencia universitaria

Nota: En la tabla se aprecia la formación y experiencia de los tres expertos que evaluaron la propuesta de transformación. Fuente: el autor.

2. Primera ronda de consulta: Se hizo la presentación de la propuesta de transformación a los participantes por medio de un informe ejecutivo y un video explicativo para su revisión general. Los expertos ofrecieron diversas observaciones cualitativas sobre su factibilidad, coherencia, pertinencia e innovación.
3. Segunda Ronda: Se realizan las modificaciones sobre las observaciones cualitativas compartidas por los expertos en la primera ronda y se aplica la **rúbrica de Evaluación de la propuesta metodológica** que se encuentra en el **Anexo C** con escala tipo Likert (1 a 5) para evaluar los criterios de pertinencia,

validez, aplicabilidad, factibilidad, novedad y generalización. A continuación, se presenta la tabulación de la información por parte de los expertos:

Tabla 40.
Validez y juicio por parte de los expertos.

Criterios	Experto		
	1	2	3
	Valoración (1 a 5)	Valoración (1 a 5)	Valoración (1 a 5)
Pertinencia: La propuesta responde a una necesidad real y contextualizada del entorno educativo en relación con el monitoreo de la calidad del aire.	5	5	5
Validez: La propuesta cumple su función de forma adecuada, alineada con los objetivos de la investigación y con sustento teórico sólido.	5	5	5
Factibilidad: La propuesta puede ser aplicada con los recursos disponibles y en las condiciones reales del entorno escolar.	5	5	5
Aplicabilidad: Puede ser replicada o adaptada en otras instituciones con condiciones similares.	5	4	5
Generalización: Tiene el potencial de ser escalada o extendida a otros contextos territoriales similares.	5	5	5
Novedad y originalidad: Propone elementos o combinaciones metodológicas que no se han trabajado de forma similar en el país o región.	5	5	5
Coherencia interna: Existe una relación clara y lógica entre los objetivos, fases, acciones e instrumentos de la propuesta.	5	4	5
Sustento científico: La propuesta está respaldada en marcos teóricos, metodológicos y experiencias previas debidamente referenciadas.	5	4	4
Impacto educativo: La propuesta contribuye a la mejora del proceso pedagógico y la formación de conciencia ambiental en las instituciones.	5	5	5
Sostenibilidad: Incluye estrategias de continuidad, mantenimiento y evaluación que aseguran su funcionamiento a largo plazo.	5	5	5
Total	50	47	49
%	100%	94%	98%

Nota: En la tabla se aprecia los criterios de evaluación de la propuesta de transformación y la calificación emitida por cada experto de acuerdo con cada criterio. Fuente: el autor.

4. Procesamiento estadístico: El resultado del experto 1 brindó una calificación del 100%, por otra parte, el experto 3 otorgó una calificación del 98% de los puntos, finalmente el experto 2 indicó una calificación del 94% de los puntos totales. El 60% de los criterios de evaluación tienen una desviación estándar de 0 y un promedio de calificación de 5 (Excelente), mientras que del 40% de los criterios de evaluación tienen una leve variación en la desviación estándar de 0.58, lo que indica ligeras diferencias, sin embargo, el promedio de calificación de este grupo de criterios se encuentra en 4.66, lo que indica que se encuentra dentro del rango de calificación de excelente.
5. Resultados: Todos los criterios de evaluación obtuvieron promedios mayores a 4.6 sobre 5. Según los expertos la propuesta de transformación fue catalogada como altamente pertinente, innovadora y aplicable en instituciones con limitaciones técnicas o económicas.

Cumplimiento de los requisitos de la propuesta de transformación

Pertinencia: La propuesta responde a las necesidades de solución de un problema real en el contexto colombiano y está alineada a los retos del país y orientada en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible 3 salud y bienestar, 11 ciudades y comunidades sostenibles y 13 acción por el clima.

Validez: No solo cumple con la función de medir, sino que también propone análisis de los datos para tomar decisiones pedagógicas, ambientales y políticas locales aplicables a cada institución.

Factibilidad: La propuesta permite ser probada en campo con una proporción mínima de recursos económicos comparable con las estaciones acreditadas, demostrando su viabilidad.

Aplicabilidad: Pueden ser implementadas por otras instituciones, incluso en contextos diferentes, como las industrias, gracias a que posee instrumentos y guías de fácil adaptabilidad.

Generalización: La propuesta de transformación tiene el potencial de replicarse en otras regiones e incluso en contextos internacionales que posean características similares e intereses de aplicación.

Novedad y originalidad: Integra tecnologías emergentes como el IoT, la implementación de la educación ambiental, conciencia ciudadana apoyado con una validación técnica y científica en un solo modelo metodológico aplicable y replicable en el país.

La propuesta metodológica desarrollada, genera un cambio sustancial en la forma como se aborda la educación ambiental. Adicionalmente que representa una solución técnica para el monitoreo ambiental, teniendo como actores clave la participación de la comunidad académica en todos los niveles de formación e incluso los entes administrativos, lo que permite tener una apropiación de los proyectos con el uso de datos reales, generando un alto nivel de empoderamiento de toda la comunidad escolar. La validación empírica y conceptual ha demostrado que esta propuesta es una herramienta viable, aplicable y replicable que responde efectivamente a las necesidades y al problema identificado en esta tesis doctoral.

CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral tuvo como eje fundamental la formulación y desarrollo de una metodología que tiene como principal fin, el aprovechamiento de las tecnologías emergentes como el IoT para el uso eficiente de estaciones de monitoreo de variables ambientales, de bajo costo, que contribuya a la sostenibilidad, precisión de los datos y mejora en la gestión operativa de dichas estaciones en las instituciones colombianas. Para alcanzar este objetivo, se formularon cuatro objetivos específicos que orientaron a la investigación y sirvieron de base para el diagnóstico, análisis de datos y diseño de la propuesta metodológica. A continuación, se sintetizan y comparten los hallazgos obtenidos en cada uno de ellos, destacando los aportes generados en cada etapa de la investigación que permitieron brindar una solución al problema.

Respecto al primer objetivo específico, la sistematización de los fundamentos teóricos permitió integrar en un solo cuerpo conceptual los principales elementos que sustentan esta investigación doctoral. Se evidenció que los contaminantes atmosféricos como $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , CO y O_3 representan un riesgo significativo tanto para la salud pública como para el medio ambiente, siendo prioritario su monitoreo. Asimismo, se reconoció que el IoT ofrece ventajas en la conectividad, escalabilidad y bajo costo, aunque aún presenta limitaciones de precisión que requieren procesos de validación. En consecuencia, los fundamentos teóricos aportan los criterios necesarios para el diseño de una metodología integral, innovadora y contextualizada que articule tecnología, educación y sostenibilidad en la gestión de la calidad del aire.

En relación con el segundo objetivo específico, se indagó y analizó el estado actual de las estaciones de monitoreo de calidad del aire tanto de estaciones oficiales como red de SISAIRE y RMCAB como la de la red aqicn (bajo costo) en instituciones públicas y privadas del país, evidenciándose la falta de cobertura de este tipo de sistema de monitoreo en gran parte del país. Así mismo, a pesar de que se logró evidenciar la existencia de un gran número de estaciones de bajo costo con tecnología IoT, estas presentan limitaciones a la hora de la validación de los datos, número de variables medidas y mantenimiento técnico. La culminación de esta etapa permitió tener una contextualización más clara del problema y así establecer las bases para la formulación de una metodología que fuera aplicable a instituciones tanto públicas como privadas con limitaciones de carácter técnico y de recursos económicos.

Respecto al tercer objetivo específico, se realizó una recopilación estratégica de información de las plataformas de las estaciones de monitoreo de fuentes oficiales de SISAIRE y

RM CAB con respecto de la red aqicn, en primera medida con estaciones ubicadas en la misma ubicación geográfica y con información histórica de variables ambientales $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , CO_2 , O_3 y NH_3 . El análisis estadístico realizado entre las estaciones de IoT y las oficiales permitió identificar similitudes entre los datos a analizados, estos hallazgos se fundamentan en comparación de la información de cada una de las estaciones seleccionadas teniendo en cuenta la desviación estándar entre las variables de cada estación, el porcentaje de coeficiente de variación y la comparación promedio de los datos entre ambos sistemas de información, los cuales presentaron una ligera variación en la precisión y un nivel aceptable de concordancia en tendencias. Estos resultados argumentan la necesidad de crear una metodología aplicable a las estaciones de monitoreo IoT de bajo costo que incluya procesos orientados a la validación, calibración y uso de datos confiables en contextos educativos.

En relación con el cuarto objetivo específico, se diseñó una metodología, la cual se estructuró en seis fases: diagnóstico institucional, implementación técnica, formación y apropiación, validación de datos, socialización y mejora continua. Esta metodología fue validada a través del método Delphi con la participación de 3 expertos en la temática, quienes proporcionaron en el 60% de los criterios una calificación promedio de 5 (La más alta), mientras que en el 40% de los criterios obtuvo una valoración promedio igual o superior a 4.6, reflejando valoraciones generales por cada experto del 100%, 98% y 94% del total de los puntos de la rúbrica de evaluación de la propuesta de transformación respectivamente.

La metodología propuesta representa un aporte novedoso e innovador al potencializar la integración de la tecnología IoT aplicada en la medición de variables ambientales, con la educación y conciencia ambiental sumándose con la participación de la comunidad académica y estudiantil, con el apoyo de distintos instrumentos que son adaptables y fácilmente replicables a diversos contextos institucionales nacionales e incluso a contextos internacionales con características similares. Además, la metodología promueve el uso eficiente de la información (Datos de las estaciones oficiales y de bajo costo) para convertirlos en información que puede ser tomada en cuenta para la generación de directrices y políticas internas aplicada a situaciones reales tanto para procesos académicos y ambientales que promueven la conciencia e incentiva a su participación.

Finalmente, los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis doctoral han logrado cumplir con los objetivos planteados, evidenciando la pertinencia y utilidad de la propuesta

metodológica. Así mismo, este trabajo contribuye significativamente al mejoramiento de los sistemas de monitoreo de bajo costo que existen actualmente, e incentiva a la adaptación y realización de futuros trabajos de la gestión de las tecnologías IoT basados en la validez de los datos y la gestión ambiental en las instituciones.

RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo de investigación y los resultados y conclusiones obtenidas, denotan desafíos y oportunidades que se pueden presentar en el presente y trabajos futuros. En este sentido, se presentan las siguientes recomendaciones que podrían ser adoptadas y aplicadas en otros escenarios y contextos, los cuales están destinados a la mejora de la calidad de la información generados por los sistemas IoT en la medición de variables ambientales.

Desde el punto de vista metodológico: Al realizar la aplicación de esta metodología en diferentes contextos educativos tanto en la zona urbana como rural, se recomienda realizar los ajustes específicos según las necesidades técnicas, de infraestructura y académicas de cada institución, lo que le permitirá maximizar la aplicación de la metodología y obtener mejores resultados a su contexto específico. Adicionalmente, en trabajos futuros, esta metodología puede llegar a potencializar aún más con el uso de técnicas avanzadas para el análisis de grandes volúmenes de datos, como aplicaciones con Big Data, Machine Learning, Modelos adaptativos y predictivos, y finalmente con el entrenamiento de modelos basados en inteligencia artificial.

Desde el punto de vista académico: Es importante que las instituciones promuevan la interdisciplinariedad para el desarrollo de proyectos con diversos campos como la tecnología, medio ambiente y educación, con el fin de tener análisis y miradas desde varias áreas del saber. Asimismo, el trabajo colaborativo en red con otras instituciones potencializa el intercambio de información y la propuesta de nuevas soluciones que mejoren las condiciones actuales de su territorio y comunidades. Finalmente, el uso de los sensores de bajo costo y la adopción de tecnologías IoT permiten tener información en tiempo real y la obtención de datos para la enseñanza de las ciencias en computación, matemáticas y medio ambiente.

Recomendaciones prácticas: Se sugiere que las entidades encargadas del monitoreo de variables ambientales y de calidad del aire como las secretarías de medio ambiente y las corporaciones autónomas regionales como Cormacarena, capacitan y motivan en las instituciones educativas al desarrollo de proyectos de medición y monitoreo de variables ambientales por medio de la tecnología IoT, con el fin de crear conciencia ciudadana en las comunidades hacia la protección del medio ambiente. Igualmente, generar convenios y alianzas con las instituciones educativas y así compartir las últimas tecnologías adoptadas para la medición de variables. Asimismo, fortalecer la relación Academia – Empresa – Estado, para la gestión adecuada de capacitaciones, mantenimientos y sostenibilidad de los sistemas instalados.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2007). *Un resumen de la Ley de Aire Limpio*. https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2020-05/documents/050720_cleanairact_un_resumen_de_la_ley_de_aire_limpio.pdf
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2023). *Contaminación del aire de Bogotá: Mapa de la calidad del aire en tiempo real*. <https://aqicn.org/map/bogota/es/>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). (2024). *Air Quality | US EPA*. <https://www.epa.gov/air-quality>
- Ali, S., Glass, T., Parr, B., Potgieter, J., & Alam, F. (2021). Low-Cost Sensor with IoT Lora WAN Connectivity and Machine Learning-Based Calibration for Air Pollution Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3034109>
- Al-Kindi, S. G., Brook, R. D., Biswal, S., & Rajagopalan, S. (2020). Environmental determinants of cardiovascular disease: lessons learned from air pollution. In *Nature Reviews Cardiology* (Vol. 17, Issue 10, pp. 656–672). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41569-020-0371-2>
- Alulema, D. (2021). *Una Metodología basada en Modelos y Servicios para la Integración de Sistemas IoT*. 1. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=288217&info=resumen&idioma=SPA>
- Barbosa, B. C. (2024, Octubre 1). *ESTABLECIMIENTOS EDUCATIVOS-COLOMBIA*.
- Blessing, L. T. M., & Chakrabarti, A. (2009). DRM, a design research methodology. *DRM, a Design Research Methodology*, 1–397. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1/COVER>
- Brook, R. D., Franklin, B., Cascio, W., Hong, Y., Howard, G., Lipsett, M., Luepker, R., Mittleman, M., Samet, J., Smith, S. C., & Tager, I. (2004). Air pollution and cardiovascular disease: A statement for healthcare professionals from the expert panel on population and prevention science of the American Heart Association. *Circulation*, 109(21), 2655–2671. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8/ASSET/F766CAFD-452E-44E2-875D-8B93E231BB2B/ASSETS/GRAPHIC/32FF2.JPEG>
- Cartuche Calva, J. J., Hernández Rojas, D. L., Morocho Román, R. F., & Radicelli García, C. D. (2021). Seguridad IoT: Principales amenazas en una taxonomía de activos. *HAMUT'AY*, 7(3), 51. <https://doi.org/10.21503/HAMU.V7I3.2192>

- Chojer, H., Branco, P. T. B. S., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Sousa, S. I. V. (2022). Can data reliability of low-cost sensor devices for indoor air particulate matter monitoring be improved? – An approach using machine learning. *Atmospheric Environment*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119251>
- Congreso de la República. (2019). *Ley 1972 de 2019*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approach* (5th ed.). SAGE Publications.
- Cueva Luza, T., Jara Córdova, O., Arias Gonzáles, J. L., Flores Limo, F. A., & Balmaceda Flores, C. A. (2023). Métodos mixtos de investigación para principiantes. In *Métodos mixtos de investigación para principiantes*. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.106>
- DAFP. (1993). *Ley 99 de 1993*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- DAFP. (2011). *Ley de Creación de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/decreto-3573-2011.pdf>
- Dominski, F., Branco, J., & Buonanno, G. (2021). Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *ElsevierFH Dominski, JHL Branco, G Buonanno, L Stabile, MG Da Silva, An Andrade Environmental Research, 2021•Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935121007817>
- Flores Roca, G. F. (2020). Limitaciones de la gestión del material particulado del aire proveniente de fuentes móviles en Lima Metropolitana al 2020. *Repositorio Académico USMP*. <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/8724>
- Gallardo, A. R., Román, J., Morales, H., Sandoval, S., María, C., Espinosa, E. C., & Cabello Espinosa, E. (2020). *EL INTERNET DE LAS COSAS Y SU IMPACTO EN LA EDUCACIÓN*.
- Gamboa, V. S., Kinast, É. J., & Pires, M. (2023). System for performance evaluation and calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 14(2), 101645. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2022.101645>
- García-Delgadillo, J. M. (2022). Use of MODiS-MAiAC (aod) Satellite Images as Qualitative Indicators of the Concentration of Particulate Matter pm2.5 in Bogota City. *Cuadernos de*

- Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31(1), 211–221.
<https://doi.org/10.15446/RCDG.V31N1.87247>
- Gouveia, N., Rodríguez-Hernández, J. L., Kephart, J. L., Ortigoza, A., Betancourt, R. M., Sangrador, J. L. T., Rodríguez, D. A., Diez Roux, A. V., Sánchez, B., & Yamada, G. (2024). Short-term associations between fine particulate air pollution and cardiovascular and respiratory mortality in 337 cities in Latin America. *Science of The Total Environment*, 920, 171073. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.171073>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta edición). McGRAW-HILL.
- Hernández Sampieri, Roberto., & Mendoza Torres, C. Paulina. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2020). La ruta de los métodos mixtos. In *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*.
- Hong, G. H., Le, T. C., Tu, J. W., Wang, C., Chang, S. C., Yu, J. Y., Lin, G. Y., Aggarwal, S. G., & Tsai, C. J. (2021). Long-term evaluation and calibration of three types of low-cost PM2.5 sensors at different air quality monitoring stations. *Journal of Aerosol Science*, 157, 105829. <https://doi.org/10.1016/J.JAEROSCI.2021.105829>
- Huangfu, P., & Atkinson, R. (2020). Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. In *Environment International* (Vol. 144). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>
- IBM. (2023, Noviembre). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?* <https://www.ibm.com/mx-es/topics/internet-of-things>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2021*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Informe%20Calidad%20del%20Aire%202021.pdf>
- Islam, M. M., Rahaman, A., & Islam, M. R. (2020). Development of Smart Healthcare Monitoring System in IoT Environment. *SN Computer Science*, 1(3). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00195-y>

- Jo, J., Jo, B., Kim, J., Kim, S., & Han, W. (2020). Development of an IoT-Based indoor air quality monitoring platform. *Journal of Sensors*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8749764>
- Laino, E., & Iglesias, G. (2024). Beyond coastal hazards: A comprehensive methodology for the assessment of climate-related hazards in European coastal cities. *Ocean & Coastal Management*, 257, 107343. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2024.107343>
- Langiano, E., Ferrara, M., Falese, L., Lanni, L., Diotaiuti, P., Di Libero, T., & De Vito, E. (2024). Assessment of Indoor Air Quality in School Facilities: An Educational Experience of Pathways for Transversal Skills and Orientation (PCTO). *Sustainability (Switzerland)*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/su16156612>
- Laura, C. :, Díaz-Bravo, P., Díaz-Bravo, L., Torruco-García, U., Martínez-Hernández, M., & Varela-Ruiz, M. (2013). La entrevista, recurso flexible y dinámico. *Investigación En Educación Médica*, 2(7), 162–167. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-50572013000300009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- León Salas, Y. D., & José Alejandro, J. A. (2024). Aplicabilidad de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir material particulado en calidad del aire. *Cultura Científica y Tecnológica*, 21(1), 13–29. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2024.1.2.2>
- Lombardi, M., Pascale, F., & Santaniello, D. (2021). Internet of things: A general overview between architecture, protocols, and applications. *Information (Switzerland)*, 12(2), 1–21. <https://doi.org/10.3390/info12020087>
- Lopez-Restrepo, S., Yarce, A., Pinel, N., Quintero, O. L., Segers, A., & Heemink, A. W. (2020). Forecasting PM10 and PM2.5 in the Aburrá Valley (Medellín, Colombia) via EnKF based data assimilation. *Atmospheric Environment*, 232, 117507. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2020.117507>
- Ma, X., Liu, H., Liu, Q., & Wang, Y. (2024). PM2.5 estimated directly from satellite data and from fused data produced by an interpretable multi-model stacking ensemble method. *Atmospheric Pollution Research*, 15(10). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102259>
- Malhotra, P., Singh, Y., Anand, P., Bangotra, D. K., Singh, P. K., & Hong, W. C. (2021). Internet of things: Evolution, concerns, and security challenges. *Sensors*, 21(5), 1–35. <https://doi.org/10.3390/s21051809>

- Mangones, S. C., Jaramillo, P., Rojas, N. Y., & Fischbeck, P. (2020). Air pollution emission effects of changes in transport supply: the case of Bogotá, Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 35971–35978. <https://doi.org/10.1007/S11356-020-08481-1/METRICS>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2020.00014/FULL>
- Marcelino Aranda, M., Martínez Cuevas, M. del C., & Camacho Vera, A. D. (2024). Análisis documental, un proceso de apropiación del conocimiento. *Revista Digital Universitaria*, 25(6). <https://doi.org/10.22201/CEIDE.16076079E.2024.25.6.1>
- Martínez-Corona, J. I., Palacios-Almón, G. E., & Oliva-Garza, D. B. (2023). Guía para la revisión y el análisis documental: propuesta desde el enfoque investigativo. *Ra Ximhai*, 67–83. <https://doi.org/10.35197/rx.19.01.2023.03.jm>
- MAVDT. (2010). *Resolución 610 de 2010*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-610-de-2010.pdf>
- Mazutti, J., Londero Brandli, L., Lange Salvia, A., Fritzen Gomes, B. M., Damke, L. I., Tibola da Rocha, V., & Santos Rabello, R. dos. (2020). Smart and learning campus as living lab to foster education for sustainable development: an experience with air quality monitoring. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 21(7), 1311–1330. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-01-2020-0016>
- Miñarro, M. D., Bañón, D., Egea, J. A., Costa-Gómez, I., & Caracena, A. B. (2020). A multi-pollutant methodology to locate a single air quality monitoring station in small and medium-size urban areas. *Environmental Pollution*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115279>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2017). *Resolución 2254 de 2017*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Nava de Villalobos, H. (2002). *La investigación jurídica ¿Cómo se elabora el proyecto?* Edit. de la Universidad de Zulia.

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2015). *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*. OECD.
<https://doi.org/10.1787/9789264239012-en>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Air quality guidelines: global update 2005*. World Health Organization.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021a). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021b). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Resumen ejecutivo*.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). *Estructura organizativa de la OMS*.
<https://www.who.int/es/about/structure>
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2023). *Calidad del aire*.
<https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Peralta, O., Crawford, J., Murphy, J., Rojas, N. Y., Huneus, N., Dawidowski, L., & Hoelzemann, J. (2023). Regional and Urban Air Quality in the Americas. *Handbook of Air Quality and Climate Change*, 665–707. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2760-9_15
- PNUMA. (2014). *Convenio de Basilea*.
<https://www.basel.int/portals/4/basel%20convention/docs/text/baselconvention-text-s.pdf>
- Rodríguez Jiménez, A., & Pérez Jacinto, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, 175–195. <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Saffon, I., Costa, Y. J., & Betancur, J. F. (2022). Calidad del aire y su relación con enfermedades respiratorias en la ciudad de Manizales. *Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales*, 2, 129–142. <https://doi.org/10.53010/nys2.06>
- Saini, J., Dutta, M., & Marques, G. (2021). Sensors for indoor air quality monitoring and assessment through Internet of Things: a systematic review. In *Environmental Monitoring*

- and Assessment* (Vol. 193, Issue 2). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08781-6>
- Sánchez-Fernández, A., Coll-Aliaga, E., Lerma-Arce, V., & Lorenzo-Sáez, E. (2023). Evaluation of Different Natural Ventilation Strategies by Monitoring the Indoor Air Quality Using CO₂ Sensors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(18). <https://doi.org/10.3390/ijerph20186757>
- Singh, D., Dahiya, M., Kumar, R., & Nanda, C. (2021). Sensors and systems for air quality assessment monitoring and management: A review. *Journal of Environmental Management*, 289, 112510. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112510>
- Sistema Nacional de Información de la Educación Superior (SNIES). (2024, Diciembre 3). *Bases consolidadas SNIES*.
- Statista. (2024). *Internet de las cosas (IoT): dispositivos conectados en el mundo 2015-2030* | Statista. <https://es.statista.com/estadisticas/517654/prevision-de-la-evolucion-de-los-dispositivos-conectados-para-el-internet-de-las-cosas-en-el-mundo/>
- STOCKHOLM CONVENTION. (2023). *STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POPS) TEXT AND ANNEXES REVISED IN 2023*.
- Tagle, M., Rojas, F., Reyes, F., Vásquez, Y., Hallgren, F., Lindén, J., Kolev, D., Watne, Å. K., & Oyola, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>
- Torres-Miranda, T., & Torres-Miranda, T. (2020). En defensa del método histórico-lógico desde la Lógica como ciencia. *Revista Cubana de Educación Superior*, 39(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142020000200016&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Valle Lima, A. (2007). Algunos modelos importantes en la investigación pedagógica. *ICCP-MES*, 67.
- Vallejo-Sánchez, D., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Londoño, L. F., & Bustamante-Rúa, O. (2024). Desarrollo de una Arquitectura IoT para monitoreo ambiental: integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. *DYNA*, 91(231), 163–168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n231.112093>

- Vasile, V., Catalina, T., Dima, A., & Ion, M. (2024). Pollution Levels in Indoor School Environment—Case Studies. *Atmosphere*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/atmos15040399>
- World Health Organization. (2024, June 25). *Air quality, energy, and health*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Yepes G., E. (2023). *RELACIÓN ENTRE ESTRATIFICACIÓN SOCIOECONÓMICA Y EXPOSICIÓN AL MATERIAL PARTICULADO (PM 10 Y PM 2.5) EN EL ÁREA URBANA DE BOGOTÁ (COLOMBIA)*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Anexos**Anexo A. Instrumentos de recolección de información****GUÍA DE REVISIÓN DOCUMENTAL**

1. Datos Generales del Documento

- **Tipo de documento:** Artículo científico Informe técnico Normativa Base de datos Otro: _____
 - **Autor(es):** _____
 - **Año de publicación:** _____
 - **Fuente o entidad:** _____
 - **Título del documento:** _____
 - **Lugar de publicación:** _____
 - **Disponibilidad:** Acceso libre Acceso restringido Suscripción
 - **Enlace o referencia:** _____
-

2. Contenido Relevante

- **Tema principal:** _____
 - **Objetivo del documento:**

 - **Resumen de los hallazgos principales:**

-

3. Relación con la Investigación

- **Variables abordadas en el documento:** PM2.5 O3 CO2 NH3 CO
Otro: _____
- **Metodología utilizada:** Cuantitativa Cualitativa Mixta

- **Resultados clave aplicables a la investigación:**

4. Crítica y Evaluación del Documento

- **Fortalezas del documento:**

- **Limitaciones o vacíos:**

- **Nivel de confiabilidad de la fuente:** () Alta () Media () Baja

- **Relevancia para la investigación:** () Alta () Media () Baja

5. Observaciones y Reflexiones Finales

Firma del Investigador: _____

Fecha: _____

GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE

1. Datos Generales de la Observación

- **Fecha de observación:** _____
- **Ubicación de la estación:** _____
- **Nombre del observador:** _____
- **Tipo de estación:**
 Estación acreditada por IDEAM Estación de bajo costo (IoT)
- Otra: _____

2. Infraestructura y Estado Físico

Criterio	Observación (Marcar con una X)	Comentarios
Estructura en buen estado	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
Protección contra lluvia y sol	<input type="checkbox"/> Adecuada <input type="checkbox"/> Deficiente	
Ubicación adecuada (sin obstrucciones)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
Alimentación energética estable	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	

3. Funcionamiento y Precisión de Medición

Criterio	Observación (Marcar con una X)	Comentarios
Variables monitoreadas (PM2.5, O3, CO2, NH3, CO)	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	

Sensor calibrado recientemente	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
Comparación con estaciones oficiales	<input type="checkbox"/> Coincide <input type="checkbox"/> Diferencias	
Registro continuo de datos	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	

4. Accesibilidad y Conectividad

Criterio	Observación (Marcar con una X)	Comentarios
Conexión a internet activa	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	
Plataforma de acceso a datos	<input type="checkbox"/> Web <input type="checkbox"/> App <input type="checkbox"/> No disponible	
Registros históricos accesibles	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	

5. Mantenimiento y Sostenibilidad

Criterio	Observación (Marcar con una X)	Comentarios
Frecuencia de mantenimiento	<input type="checkbox"/> Semanal <input type="checkbox"/> Mensual <input type="checkbox"/> Anual	
Disponibilidad de repuestos	<input type="checkbox"/> Alta <input type="checkbox"/> Media <input type="checkbox"/> Baja	
Costos operativos elevados	<input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	

6. Observaciones Adicionales

7. Firma del Observador

Nombre: _____

Firma: _____

Fecha: _____

GUION DE ENTREVISTA PARA EXPERTOS EN MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE - DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA

1. Datos Generales del Entrevistado

- **Nombre:** __Miguel Ordoñez__
 - **Cargo/Profesión:** __Ing. Físico Maestría y doctorado en Sistemas Mecatrónicos__
 - **Institución/Empresa:** _____
 - **Fecha de la entrevista:** _____
-

2. Introducción

Agradecemos su participación en esta entrevista, que tiene como objetivo comprender los retos, oportunidades y mejoras en el monitoreo de la calidad del aire en Colombia, con especial enfoque en estaciones de bajo costo y tecnología IoT. Su experiencia y conocimientos serán clave para enriquecer nuestra investigación doctoral. Todas las respuestas serán tratadas de manera confidencial y utilizadas exclusivamente con fines académicos.

3. Preguntas Generales (Para todos los entrevistados)

1. Desde su experiencia, ¿cuál considera que es el estado actual del monitoreo de la calidad del aire en Colombia?
2. ¿Cuáles son los principales retos que enfrentan las estaciones de monitoreo de calidad del aire en términos de operación y mantenimiento?
3. ¿En qué medida cree que las tecnologías IoT han mejorado o podrían mejorar la precisión y accesibilidad de los datos sobre calidad del aire?
4. ¿Qué metodologías considera más adecuadas para validar los datos obtenidos de estaciones IoT de bajo costo?
5. ¿Cree que la información generada por estos sistemas está siendo bien utilizada por entidades gubernamentales y académicas? ¿Por qué?
6. ¿Cuáles considera que son los principales factores que afectan la confiabilidad de los datos en estaciones de monitoreo de calidad del aire?
7. ¿Qué estrategias recomendaría para mejorar la integración de datos de estas estaciones en las decisiones políticas y ambientales?

4. Preguntas Específicas por Perfil

Para el Doctor en Ingeniería Física

8. Desde una perspectiva científica, ¿qué limitaciones presentan los sensores de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire?
9. ¿Qué innovaciones tecnológicas podrían mejorar la precisión de estas estaciones?
10. ¿Cree que el uso de inteligencia artificial podría ayudar en la interpretación de los datos de calidad del aire?

5. Cierre de la Entrevista

Muchas gracias por su tiempo y por compartir sus conocimientos. Sus respuestas serán fundamentales para el desarrollo de nuestra investigación. Si tiene alguna otra observación o considera que hay aspectos adicionales que deberíamos abordar, estaré encantado de escucharlos.

Observaciones adicionales del entrevistado:

Firma del entrevistador: _____

Fecha: _____

GUIÓN DE ENTREVISTA PARA EXPERTOS EN MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE - TÉCNICO ESPECIALISTA EN ESTACIONES DE MONITOREO

1. Datos Generales del Entrevistado

- **Nombre:** _____
 - **Cargo/Profesión:** _____
 - **Institución/Empresa:** _____
 - **Fecha de la entrevista:** _____
-

2. Introducción

Agradecemos su participación en esta entrevista, que tiene como objetivo comprender los retos, oportunidades y mejoras en el monitoreo de la calidad del aire en Colombia, con especial enfoque en estaciones de bajo costo y tecnología IoT. Su experiencia y conocimientos serán clave para enriquecer nuestra investigación doctoral. Todas las respuestas serán tratadas de manera confidencial y utilizadas exclusivamente con fines académicos.

3. Preguntas Generales (Para todos los entrevistados)

1. Desde su experiencia, ¿cuál considera que es el estado actual del monitoreo de la calidad del aire en Colombia?
2. ¿Cuáles son los principales retos que enfrentan las estaciones de monitoreo de calidad del aire en términos de operación y mantenimiento?
3. ¿En qué medida cree que las tecnologías IoT han mejorado o podrían mejorar la precisión y accesibilidad de los datos sobre calidad del aire?
4. ¿Qué metodologías considera más adecuadas para validar los datos obtenidos de estaciones IoT de bajo costo?
5. ¿Cree que la información generada por estos sistemas está siendo bien utilizada por entidades gubernamentales y académicas? ¿Por qué?
6. ¿Cuáles considera que son los principales factores que afectan la confiabilidad de los datos en estaciones de monitoreo de calidad del aire?
7. ¿Qué estrategias recomendaría para mejorar la integración de datos de estas estaciones en las decisiones políticas y ambientales?

4. Preguntas Específicas por Perfil

Para el Técnico Especialista en Estaciones de Monitoreo

8. ¿Cuáles son los problemas técnicos más frecuentes que enfrenta en el mantenimiento de las estaciones de monitoreo?
9. ¿Qué tan viable es la reparación y calibración de estaciones IoT de bajo costo en comparación con las acreditadas?
10. ¿Cree que las estaciones actuales cumplen con los requerimientos de conectividad y almacenamiento de datos?

5. Cierre de la Entrevista

Muchas gracias por su tiempo y por compartir sus conocimientos. Sus respuestas serán fundamentales para el desarrollo de nuestra investigación. Si tiene alguna otra observación o considera que hay aspectos adicionales que deberíamos abordar, estaré encantado de escucharlos.

Observaciones adicionales del entrevistado:

Firma del entrevistador: _____

Fecha: _____

GUIÓN DE ENTREVISTA PARA EXPERTOS EN MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE - FUNCIONARIO DE CORMACARENA

1. Datos Generales del Entrevistado

- **Nombre:** _____
 - **Cargo/Profesión:** _____
 - **Institución/Empresa:** _____
 - **Fecha de la entrevista:** _____
-

2. Introducción

Agradecemos su participación en esta entrevista, que tiene como objetivo comprender los retos, oportunidades y mejoras en el monitoreo de la calidad del aire en Colombia, con especial enfoque en estaciones de bajo costo y tecnología IoT. Su experiencia y conocimientos serán clave para enriquecer nuestra investigación doctoral. Todas las respuestas serán tratadas de manera confidencial y utilizadas exclusivamente con fines académicos.

3. Preguntas Generales (Para todos los entrevistados)

1. Desde su experiencia, ¿cuál considera que es el estado actual del monitoreo de la calidad del aire en Colombia?
2. ¿Cuáles son los principales retos que enfrentan las estaciones de monitoreo de calidad del aire en términos de operación y mantenimiento?
3. ¿En qué medida cree que las tecnologías IoT han mejorado o podrían mejorar la precisión y accesibilidad de los datos sobre calidad del aire?
4. ¿Qué metodologías considera más adecuadas para validar los datos obtenidos de estaciones IoT de bajo costo?
5. ¿Cree que la información generada por estos sistemas está siendo bien utilizada por entidades gubernamentales y académicas? ¿Por qué?
6. ¿Cuáles considera que son los principales factores que afectan la confiabilidad de los datos en estaciones de monitoreo de calidad del aire?
7. ¿Qué estrategias recomendaría para mejorar la integración de datos de estas estaciones en las decisiones políticas y ambientales?

4. Preguntas Específicas por Perfil

Para el funcionario de Cormacarena

- a. ¿Cuál es el papel de Cormacarena en la regulación y operación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en Colombia?
 - b. ¿Existen iniciativas en marcha para fortalecer la red de monitoreo de calidad del aire en la región?
 - c. ¿Qué limitaciones presupuestarias o administrativas enfrenta la entidad en la gestión de estos sistemas?
-

5. Cierre de la Entrevista

Muchas gracias por su tiempo y por compartir sus conocimientos. Sus respuestas serán fundamentales para el desarrollo de nuestra investigación. Si tiene alguna otra observación o considera que hay aspectos adicionales que deberíamos abordar, estaré encantado de escucharlos.

Observaciones adicionales del entrevistado:

Firma del entrevistador: _____

Fecha: _____

GUIÓN DE ENTREVISTA PARA EXPERTOS EN MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE - EXPERTO EN MEDICIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

1. Datos Generales del Entrevistado

- **Nombre:** _____
 - **Cargo/Profesión:** _____
 - **Institución/Empresa:** _____
 - **Fecha de la entrevista:** _____
-

2. Introducción

Agradecemos su participación en esta entrevista, que tiene como objetivo comprender los retos, oportunidades y mejoras en el monitoreo de la calidad del aire en Colombia, con especial enfoque en estaciones de bajo costo y tecnología IoT. Su experiencia y conocimientos serán clave para enriquecer nuestra investigación doctoral. Todas las respuestas serán tratadas de manera confidencial y utilizadas exclusivamente con fines académicos.

3. Preguntas Generales (Para todos los entrevistados)

1. Desde su experiencia, ¿cuál considera que es el estado actual del monitoreo de la calidad del aire en Colombia?
2. ¿Cuáles son los principales retos que enfrentan las estaciones de monitoreo de calidad del aire en términos de operación y mantenimiento?
3. ¿En qué medida cree que las tecnologías IoT han mejorado o podrían mejorar la precisión y accesibilidad de los datos sobre calidad del aire?
4. ¿Qué metodologías considera más adecuadas para validar los datos obtenidos de estaciones IoT de bajo costo?
5. ¿Cree que la información generada por estos sistemas está siendo bien utilizada por entidades gubernamentales y académicas? ¿Por qué?
6. ¿Cuáles considera que son los principales factores que afectan la confiabilidad de los datos en estaciones de monitoreo de calidad del aire?
7. ¿Qué estrategias recomendaría para mejorar la integración de datos de estas estaciones en las decisiones políticas y ambientales?

4. Preguntas Específicas por Perfil

Para el Experto en Medición de Calidad del Aire

8. Desde un punto de vista técnico, ¿cuál es el margen de error aceptable en la medición de contaminantes como PM2.5 y CO2?
9. ¿Existen diferencias significativas entre los datos obtenidos por estaciones de bajo costo y las acreditadas por entidades oficiales?
10. ¿Qué tipo de calibración o validación recomendaría para garantizar la confiabilidad de las mediciones?

5. Cierre de la Entrevista

Muchas gracias por su tiempo y por compartir sus conocimientos. Sus respuestas serán fundamentales para el desarrollo de nuestra investigación. Si tiene alguna otra observación o considera que hay aspectos adicionales que deberíamos abordar, estaré encantado de escucharlos.

Observaciones adicionales del entrevistado:

Firma del entrevistador: _____

Fecha: _____

Encuesta Realizada a la Comunidad Educativa sobre la Calidad del aire.

Estimado/a participante,

Esta encuesta forma parte de una investigación doctoral titulada "Metodología integral basada en Tecnología IoT para contribuir a la mejora del aprovechamiento de estaciones de monitoreo de bajo costo mediante el desarrollo de procedimientos y protocolos para la medición de variables ambientales y calidad del aire en instituciones públicas y privadas colombianas durante el periodo 2023 – 2025".

El objetivo de este estudio es comprender la percepción y el nivel de conocimiento sobre la calidad del aire en entornos educativos, así como evaluar la aceptación y posibles mejoras en el uso de tecnologías de monitoreo ambiental.

Su participación es completamente voluntaria y anónima. La información recolectada será utilizada únicamente con fines académicos y contribuirá al desarrollo de estrategias para mejorar la gestión de la calidad del aire en instituciones educativas.

Agradecemos su tiempo y colaboración. Esta encuesta tomará aproximadamente 5 minutos en completarse.

¡Gracias por su participación! 😊

Nota: Sus respuestas serán completamente anónimas y se manejan de acuerdo con las políticas de tratamiento de datos personales en Colombia, garantizando su privacidad y confidencialidad. La información recopilada se utilizará exclusivamente para fines académicos y de investigación en el marco de este proyecto de tesis doctoral. Agradecemos su colaboración y sinceridad en las respuestas.

¿Qué agentes contaminantes pueden existir en el aire y causar daño a los seres humanos?

Las variables ambientales que se desean medir y monitorear en el proyecto incluye material particulado (PM10) y (PM2.5), ozono (O3), dióxido de carbono (CO2), amoníaco (NH3) y monóxido de carbono (CO). Estas variables son cruciales porque:

- **Material Particulado (PM10):** Partículas inhalables de mayor tamaño que pueden ingresar en las vías respiratorias superiores, causando irritación, alergias y enfermedades respiratorias, especialmente en personas con afecciones preexistentes.

- **Material Particulado (PM2.5):** Partículas finas que pueden penetrar profundamente en los pulmones y entrar en el sistema sanguíneo, causando enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- **Ozono (O3):** Gas que puede causar problemas respiratorios, agravar el asma y reducir la función pulmonar, además de afectar la salud cardiovascular.
- **Dióxido de Carbono (CO2):** En niveles elevados, puede causar dolores de cabeza, mareos y, en casos extremos, problemas respiratorios graves.
- **Amoniaco (NH3):** Gas irritante que afecta los ojos, la piel y el sistema respiratorio, y puede ser especialmente dañino para las personas con afecciones respiratorias preexistentes.
- **Monóxido de Carbono (CO):** Gas tóxico que puede provocar síntomas de intoxicación como dolores de cabeza, mareos, debilidad y, en altas concentraciones, la muerte.

Normatividad Colombiana

En Colombia, la calidad del aire está regulada por la Resolución 2254 de 2017, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Esta resolución establece los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio, incluyendo material particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y monóxido de carbono (CO). Estos estándares buscan proteger la salud pública y el medio ambiente, garantizando que las concentraciones de estos contaminantes en el aire no excedan los límites que podrían representar riesgos significativos.

Enlace: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>

Información Demográfica

1. Por favor indique su edad en años:
 - a. Entre 10 y 15 años.
 - b. Entre 16 y 20 años.
 - c. Entre 21 y 25 años.
 - d. Entre 26 y 30 años.
 - e. Entre 31 y 35 años.
 - f. Entre 36 y 40 años.

- g. Entre 41 y 45 años.
 - h. Más de 45 años.
2. Por favor indique su género biológico:
- a. Masculino.
 - b. Femenino.
3. Por favor indique su ocupación:
- a. Estudiante.
 - b. Docente.
 - c. Administrador/ejecutivo en institución educativa.
 - d. Profesional del sector ambiental o tecnológico.
 - e. Otra: _____
4. Si es estudiante o docente, a que programa se encuentra vinculado:
- _____.
5. Institución a la que pertenece:
- a. Universidad de los Llanos
 - b. UNAD
 - c. AUNAR
 - d. UNIMINUTO
 - e. Universidad Santo Tomas
 - f. Otra: _____

Investigación de Variables Ambientales

6. ¿Ha notado algún problema relacionado con la calidad del aire en su entorno educativo?
- a. Si
 - b. No.
7. Si respondió "Sí", ¿Cuáles de los siguientes problemas ha observado? (Seleccione todas las que apliquen)
- a. Dificultad para respirar ().
 - b. Olor desagradable ().
 - c. Polvo visible en el aire ().
 - d. Reducción de la visibilidad en espacios abiertos ().

- e. Irritación en los ojos, nariz o garganta ().
8. ¿Qué tan importante cree que es medir la calidad del aire en su institución educativa? (Escala de 1 a 5, donde 1 es "Nada importante" y 5 es "Muy importante")
- a. 1 b. 2 c. 3 d. 4 e. 5
9. ¿Cuáles de las siguientes variables cree que es más importante medir? (Seleccione todas las que apliquen)
- a. Material particulado (PM10) ().
- b. Material particulado (PM2.5) ().
- c. Ozono (O3) ().
- d. Dióxido de Carbono (CO2) ().
- e. Amoniacó (NH3) ().
- f. Monóxido de Carbono (CO) ().
10. Ordene las siguientes variables de acuerdo con el impacto que cree que tienen en la salud de los estudiantes, de mayor a menor importancia:

	Nada Importante	Nada Importante	Nada Importante	Nada Importante	Nada Importante
Material particulado (PM10)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Material particulado (PM2.5)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ozono (O3)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Dióxido de Carbono (CO2)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Amoniacó (NH3)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11. ¿Tiene acceso a datos sobre la calidad del aire en su institución educativa?
- a. Si
- b. No
12. Si respondió "Sí", ¿Cuáles de las siguientes variables tiene datos disponibles? (Seleccione todas las que apliquen) .

- a. Material particulado (PM10) ().
 - b. Material particulado (PM2.5) ().
 - c. Ozono (O3) ().
 - d. Dióxido de Carbono (CO2) ().
 - e. Amoníaco (NH3) ().
 - f. Monóxido de Carbono (CO) ().
13. ¿Ha leído o escuchado alguna vez sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud?
- a. Si
 - b. No
14. Si respondió "Sí", ¿Qué fuentes de información ha utilizado? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Libros
 - b. Artículos científicos
 - c. Páginas web
 - d. Redes Sociales
 - e. Noticias en medios de comunicación
 - f. Cursos académicos
 - g. Otro: _____
15. ¿Está familiarizado con el uso de la tecnología IoT (Internet de las Cosas) para monitorear la calidad del aire?
- a. Si
 - b. No
16. Si respondió "Sí", ¿Cómo ha obtenido esta información? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Artículos académicos
 - b. Noticias
 - c. Cursos o seminarios
 - d. Experiencia personal
 - e. Videos educativos (YouTube, conferencias en línea, etc.)

- f. Otro: _____
17. ¿Qué dispositivos tecnológicos considera necesarios para medir la calidad del aire en su institución? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Sensores de material particulado
 - b. Sensores de gases (O₃, CO₂, NH₃, CO)
 - c. Estaciones meteorológicas
 - d. Conectividad a Internet
 - e. Otro: _____
18. ¿Qué aspectos cree que son fundamentales para un sistema efectivo de monitoreo de la calidad del aire? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Precisión de los datos
 - b. Facilidad de uso
 - c. Costos accesibles
 - d. Mantenimiento y calibración regular
 - e. Otro: _____
19. ¿Qué métodos de validación considera más apropiados para un sistema de monitoreo de calidad del aire? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Comparación con estaciones oficiales (acreditadas)
 - b. Pruebas de laboratorio
 - c. Evaluación por expertos
 - d. Calibración periódica de los sensores
 - e. Análisis estadístico de datos
 - f. Otro: _____
20. ¿Qué medios considera más efectivos para compartir los resultados del monitoreo de la calidad del aire? (Seleccione todas las que apliquen) .
- a. Informes escritos
 - b. Eventos y charlas educativas
 - c. Publicaciones en revistas académicas
 - d. Redes sociales

- e. Pantallas informativas en espacios públicos
- f. Aplicaciones móviles
- g. Otro: _____
21. ¿Cree que la comunidad educativa aceptaría la implementación de un sistema de monitoreo de calidad del aire? (Escala de 1 a 5, donde 1 es "Nada importante" y 5 es "Muy importante").
- a. 1 b. 2 c. 3 d. 4 e. 5
22. Si respondió "Sí", ¿Qué factores contribuirían a esta aceptación? (Seleccione todas las que apliquen).
- a. Concienciación sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud
- b. Información accesible
- c. Participación en el proyecto
- d. Facilidad de uso del sistema
- e. Involucramiento de la comunidad educativa
- f. Otro: _____
23. ¿Qué tan efectivos cree que son los sistemas actuales para recolectar datos sobre la calidad del aire? (Escala de 1 a 5).
- a. 1 b. 2 c. 3 d. 4 e. 5
24. ¿Cuáles de las siguientes mejoras considera más importantes para aumentar la efectividad de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire? (*Seleccione todas las que apliquen*).
- a. Mayor precisión de los sensores
- b. Reducción de costos
- c. Mayor cobertura geográfica
- d. Facilidad de acceso a los datos
- e. Mayor participación de la comunidad
- f. Integración con políticas ambientales
- g. Otro: _____

25. ¿Cómo se integraría el monitoreo de la calidad del aire en el currículo educativo?

(Seleccione todas las que apliquen).

- a. Proyectos de ciencia
- b. Clases de educación ambiental
- c. Actividades extracurriculares
- d. Uso en matemáticas y estadística
- e. Integración con asignaturas de salud
- f. Uso de plataformas digitales
- g. Otro: _____

26. ¿Qué tan fácil cree que sería para el personal educativo utilizar un sistema de monitoreo de la calidad del aire? (Escala de 1 a 5)-

- a. 1
- b. 2
- c. 3
- d. 4
- e. 5

27. ¿Qué tipo de capacitación considera necesaria para el uso de estos sistemas?

- a. Taller práctico
- b. Curso en línea
- c. Capacitación Presencial
- d. Salida de campo
- e. Otro: _____

28. ¿Cree que la información proporcionada por el monitoreo de la calidad del aire influiría en las decisiones ambientales de la institución?

- a. Si
- b. No
- c. Tal vez

29. ¿De qué manera cree que influiría la información del monitoreo de la calidad del aire en las decisiones ambientales de la institución? (Seleccione todas las que apliquen)

- a. Mejoras en la infraestructura
- b. Cambios en políticas de salud
- c. Proyectos de sostenibilidad
- d. Sensibilización y educación ambiental

- e. Adopción de tecnologías más limpias
- f. Monitoreo y seguimiento continuo de la calidad del aire
- g. Implementación de medidas para reducir la contaminación

30. ¿Le gustaría que su institución desarrollara proyectos de monitoreo de calidad del aire utilizando tecnología IoT?

- a. Sí, me parece una iniciativa necesaria
- b. Sí, pero con ciertas condiciones (presupuesto, capacitación, etc.)
- c. No lo considero prioritario
- d. No, porque no veo su utilidad
- e. Otro: _____

31. ¿Le gustaría que su institución participara en una red colaborativa de sensores de calidad del aire junto con otras instituciones Educativas?

- a. Sí, sería una excelente oportunidad para fortalecer el monitoreo ambiental
- b. Sí, pero dependería de la viabilidad técnica y económica
- c. No lo considero relevante para mi institución
- d. No, porque no es una prioridad en este momento
- e. Otro: _____

32. Por favor indíquenos si tiene alguna sugerencia:

Respuestas de la encuesta aplicada en línea: <https://bit.ly/4fQXGHk>

Anexo B. Recopilación de los datos de las fuentes oficiales y las salidas de campo.

Datos de las estaciones de monitoreo de Calidad del aire:

- Datos oficiales de la estación **Las ferias** de la red RMCAB y aqicn:
https://bit.ly/Las_ferias
- Datos oficiales de la estación **Puente Aranda** de la red RMCAB y aqicn:
https://bit.ly/Puente_Aranda
- Datos oficiales de la estación **Santa Elena** de la red SISAIRES y aqicn:
https://bit.ly/Santa_Elena1
- Datos oficiales de la estación **Tanques la Ye** de la red SISAIRES y aqicn:
https://bit.ly/Tanques_La_Ye

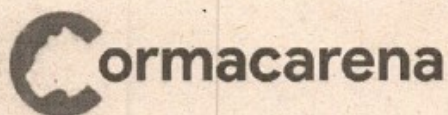
Salida de Campo a las estaciones de monitoreo.

Se anexa la solicitud radicada en la Corporación Autónoma Regional Cormacarena para la salida de campo a las estaciones de medición de calidad del aire.

Enlace: https://bit.ly/Solicitud_Cormacarena

Se anexa la respuesta radicada en la Corporación Autónoma Regional Cormacarena para la salida de campo a las estaciones de medición de calidad del aire.

Enlace: https://bit.ly/Respuesta_Cormacarena



PM.GA 3.25.2587

Villavicencio, (Meta)

Señor
ÁNGEL ALEJANDRO RODRÍGUEZ AYA
 Peticionario
arodriguezay@comunidad.uiix.edu.mx
 3166240223
 Ciudad.

CORMACARENA	
	Fecha: 25-03-2025 Hora: 01:00
Remitente: Laura Soto	Radicación S- 5472-2025
Asunto: PM. GA. 3.25.2587	Folios: 1
Destinatario: ANGEL ALEJANDRO RODRIGUEZ AYA	
Dependencia: SUBDIRECCION DE PLANEACION Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL	

Asunto: Respuesta al radicado No E-7084 del 10 de marzo de 2025.

Cordial saludo,

En atención al radicado del asunto, por medio del cual solicita información acerca de las Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire propiedad de Cormacarena, esta Corporación se permite informar lo siguiente:

Según lo acordado en la llamada telefónica del día 10 de marzo del 2025, se ha programado una visita a la estación de monitoreo, durante la cual se resolverán los interrogantes planteados. La visita se llevará a cabo en la segunda semana de abril de 2025.

Los detalles específicos a la visita, como la fecha exacta y los aspectos logísticos, serán comunicados a través del correo electrónico arodriguezay@comunidad.uiix.edu.mx en los próximos días.

Quedamos atentos a cualquier consulta adicional o requerimiento que pueda surgir antes de la visita.

Atentamente,

PATRICIA BAQUERO TORRES
 Subdirectora Gestión Ambiental

NOMBRES Y APELLIDOS	CARGO	FIRMA
Revisó: Diana Hernández Gamba	CPS Abogada grupo Aire y Urbano	
Proyecto: William Fernando Rios Miranda	CPS Subdirección de Gestión Ambiental Grupo Aire y Urbano	



Salidas de campo a las estaciones de monitoreo

A continuación, se presenta la evidencia de la salida de campo y aplicación de la guía de observación para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

Salida de campo Estación Cofrem - Villavicencio Meta



Salida de campo Estación Catumare - Villavicencio Meta

**Transcripción entrevistas a los expertos en Calidad del Aire:**

- Entrevista Técnico Especialista en Estaciones de Monitoreo: <https://bit.ly/3YOUwfO>
- Entrevista Experto en Medición de Calidad del Aire: <https://bit.ly/3Fdfsqj>
- Entrevista Doctor en Ingeniería Física: <https://bit.ly/3ScUyKN>

Anexo C. Valoración de la propuesta.

Valoración de la propuesta de transformación de los Expertos por medio del método Delphi

Experto: Juan Alejandro Chica García.

Rúbrica de Evaluación de Propuesta Metodológica – Método Delphi

Nombre de la propuesta: Metodología integral para el uso eficiente y sostenible de estaciones IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas colombianas.

Datos del Experto:

Nombres y apellidos del especialista: Juan Alejandro Chica García

Nivel máximo de formación: Maestría en Ingeniería

Instrucciones: Por favor realice la valoración de cada uno de los criterios establecidos, teniendo en cuenta una valoración de 1 a 5, en donde la **calificación de 1 es Muy Deficiente** y 5 es **Excelente**. Por favor siéntase libre de incluir observaciones cualitativas.

Criterio	Descripción	Valoración (1 a 5)	Observaciones del experto
Pertinencia	La propuesta responde a una necesidad real y contextualizada del entorno educativo en relación con el monitoreo de la calidad del aire.	5	La propuesta metodológica es pertinente ya que permite el fortalecimiento con una estructura para el seguimiento y lineamientos en el funcionamiento en estaciones meteorológicas de bajo costo.
Validez	La propuesta cumple su función de forma adecuada, alineada con los objetivos de la investigación y con sustento teórico sólido.	5	Cumple con los objetivos propuestos en el desarrollo del proyecto, hace la descripción en las actividades y fases.
Factibilidad	La propuesta puede ser aplicada con los recursos disponibles y en las condiciones reales del entorno escolar.	5	Es una propuesta metodológica en la que las instituciones tienen actividades seguimiento y listas de chequeo que son muy útiles para el monitoreo de las estaciones, al igual que plantea un trabajo en red entre instituciones con este tipo de estaciones que permitirá el apoyo entre instituciones.
Aplicabilidad	Puede ser replicada o adaptada en otras instituciones con condiciones similares.	5	El proyecto está diseñado para ser aplicable y replicable y fomenta el trabajo en red.
Generalización	Tiene el potencial de ser escalada o extendida a	5	Busca como fin integral del proyecto la creación de una

	otros contextos territoriales similares.		red de sensores o red de estaciones meteorológicas de bajo costo lo que aporta integralmente el desarrollo de los territorios
Novedad y originalidad	Propone elementos o combinaciones metodológicas que no se han trabajado de forma similar en el país o región.	5	Me gusta el proyecto en la experiencia que tengo con este tipo de estaciones desconozco procesos de seguimiento como este, salvo los que uno mismo diseña en sus proyectos.
Coherencia interna	Existe una relación clara y lógica entre los objetivos, fases, acciones e instrumentos de la propuesta.	5	Son coherentes.
Sustento científico	La propuesta está respaldada en marcos teóricos, metodológicos y experiencias previas debidamente referenciadas.	5	La propuesta tiene un fuerte marco teórico, referencial y una metodológica estructurada y lógica, al igual que cada objetivo es resuelto a través de fases y actividades, por lo que encuentro coherente el proyecto
Impacto educativo	La propuesta contribuye a la mejora del proceso pedagógico y la formación de conciencia ambiental en las instituciones.	5	Es mas un proceso de aporte al desarrollo y sostenimiento ante el deterioro de las estaciones de monitoreo de bajo costo, como también el aporte es el desarrollo de la posibilidad de trabajo en red para quienes apropien la metodología.
Sostenibilidad	Incluye estrategias de continuidad, mantenimiento y evaluación que aseguran su funcionamiento a largo plazo.	5	Es precisamente el fuerte del proyecto y es permitir que equipos de bajo costo que pueden tener una duración propensa al deterioro en función del tiempo a través de metodológicas de seguimiento y análisis puedan tener una línea de tiempo mas extensa y que sea posible el conocimiento

			de su funcionamiento a detalle.
--	--	--	---------------------------------

Opinión de aplicabilidad

Considero que la metodología propuesta es aplicable en entornos educativos donde no se cuentan con los recursos para la adquisición de equipos robustos para la medición de variables ambientales, pero que les es posible con un bajo presupuesto realizar equipos de medición homologables, y precisamente abarca una temática que es el problema fundamental de estos equipos de medición y es el mantenimiento y seguimiento después de construidos, y como demostrar que las mediciones al paso del tiempo aún pueden ser precisas y apegadas a la normatividad.

Nombres y Apellidos	Juan Alejandro Chica Garcia
Correo Electrónico	Juan.chica@unad.edu.co
Título Profesional	Ingeniero Electrónico
Estudios de Posgrado	Maestría en Ingeniería
Ocupación y años de Experiencia	Profesor del área de ingeniería 19 años de experiencia profesional.



Firma

Lugar y fecha: Villavicencio 29 de mayo de 2025

Experto: John Alejandro Figueredo Luna.

Rúbrica de Evaluación de Propuesta Metodológica – Método Delphi

Nombre de la propuesta: Metodología integral para el uso eficiente y sostenible de estaciones IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas colombianas.

Datos del Experto:

Nombres y apellidos del especialista: John Alejandro Figueredo Luna

Nivel máximo de formación: Maestría

Instrucciones: Por favor realice la valoración de cada uno de los criterios establecidos, teniendo en cuenta una valoración de 1 a 5, en donde la **calificación de 1 es Muy Deficiente** y **5 es Excelente**. Por favor siéntase libre de incluir observaciones cualitativas.

Criterio	Descripción	Valoración (1 a 5)	Observaciones del experto
Pertinencia	La propuesta responde a una necesidad real y contextualizada del entorno educativo en relación con el monitoreo de la calidad del aire.	5	Responde claramente a una necesidad real en el ámbito educativo colombiano en relación con el monitoreo ambiental. Muy bien contextualizada
Validez	La propuesta cumple su función de forma adecuada, alineada con los objetivos de la investigación y con sustento teórico sólido.	5	La propuesta está alineada con los objetivos de investigación, con una estructura metodológica clara y argumentación teórica implícita coherente.
Factibilidad	La propuesta puede ser aplicada con los recursos disponibles y en las condiciones reales del entorno escolar.	5	Aunque viable técnicamente, puede presentar desafíos en contextos con baja infraestructura o sin apoyo institución al sostenido.
Aplicabilidad	Puede ser replicada o adaptada en otras instituciones con condiciones similares.	4	La metodología permite replicación y adaptación en instituciones educativas con características similares, gracias a los instrumentos y fases detalladas.
Generalización	Tiene el potencial de ser escalada o extendida a	5	Puede escalarse a nivel territorial, pero dependerá del


	otros contextos territoriales similares.		acceso a redes colaborativas y políticas de gestión ambiental locales.
Novedad y originalidad	Propone elementos o combinaciones metodológicas que no se han trabajado de forma similar en el país o región.	5	La integración de IoT con protocolos estandarizados y el enfoque educativo-participativo presenta un enfoque innovador en el contexto nacional.
Coherencia interna	Existe una relación clara y lógica entre los objetivos, fases, acciones e instrumentos de la propuesta.	4	Una buena conexión entre objetivos, fases, acciones e instrumentos; bien estructurada y clara.
Sustento científico	La propuesta está respaldada en marcos teóricos, metodológicos y experiencias previas debidamente referenciadas.	4	La propuesta muestra conocimiento teórico, sería ideal incluir más referencias explícitas en el documento escrito.
Impacto educativo	La propuesta contribuye a la mejora del proceso pedagógico y la formación de conciencia ambiental en las instituciones.	5	Promueve formación, apropiación tecnológica y conciencia ambiental, lo cual es altamente valioso para el contexto educativo
Sostenibilidad	Incluye estrategias de continuidad, mantenimiento y evaluación que aseguran su funcionamiento a largo plazo.	5	Incluye estrategias concretas como fichas, listas de chequeo y evaluación continua que aseguran permanencia en el tiempo.

Opinión de aplicabilidad

La propuesta es altamente pertinente, clara, estructurada y con gran potencial de impacto educativo, ambiental e institucional. Ofrece instrumentos prácticos y fases bien definidas que facilitan su implementación, seguimiento y mejora. Se recomienda su aplicación y prueba piloto en diversas regiones del país.

Nombres y Apellidos	John Alejandro Figueredo Luna
Correo Electrónico	John.figuero@unad.edu.co
Título Profesional	Ingeniero de Sistemas
Estudios de Posgrado	Maestría en Educación y Maestría en gestión de TI

Ocupación y años de Experiencia	Docente Investigador - 18 años de experiencia
---------------------------------	---



Firma

Lugar y fecha: Villavicencio, 4 de junio de 2025

Experto: Ányelo Gerley Quintero

Rúbrica de Evaluación de Propuesta Metodológica – Método Delphi

Nombre de la propuesta: Metodología integral para el uso eficiente y sostenible de estaciones IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire en instituciones educativas colombianas.

Datos del Experto:

Nombres y apellidos del especialista: Anyelo Quintero Reyes

Nivel máximo de formación: Magíster en educación

Instrucciones: Por favor realice la valoración de cada uno de los criterios establecidos, teniendo en cuenta una valoración de 1 a 5, en donde la **calificación de 1 es Muy Deficiente** y **5 es Excelente**. Por favor siéntase libre de incluir observaciones cualitativas.

Criterio	Descripción	Valoración (1 a 5)	Observaciones del experto
Pertinencia	La propuesta responde a una necesidad real y contextualizada del entorno educativo en relación con el monitoreo de la calidad del aire.	5	Es altamente pertinente debido a que aborda una necesidad crítica en Colombia, mediante el monitoreo de variables ambientales y calidad del aire, especialmente en un contexto donde el uso de estaciones de bajo costo es una realidad y una oportunidad.
Validez	La propuesta cumple su función de forma adecuada, alineada con los objetivos de la investigación y con sustento teórico sólido.	5	La propuesta sí cumple su función de forma adecuada, está bien alineada con los objetivos de la investigación y posee un sustento teórico sólido.
Factibilidad	La propuesta puede ser aplicada con los recursos disponibles y en las condiciones reales del entorno escolar.	5	El autor enfatiza que la metodología busca que las universidades y otras instituciones puedan "potencializar esas estaciones" de bajo costo, lo que sugiere una optimización de recursos ya existentes o de fácil adquisición.
Aplicabilidad	Puede ser replicada o adaptada en otras instituciones con condiciones similares.	5	En efecto la estructura de la propuesta, su enfoque en la accesibilidad tecnológica y el fortalecimiento de capacidades, la hacen intrínsecamente diseñada

			para la replicación y escalabilidad en diversos entornos con condiciones similares.
Generalización	Tiene el potencial de ser escalada o extendida a otros contextos territoriales similares.	5	Tiene un alto potencial de ser extendida a otros contextos territoriales similares, y varios elementos dentro de la misma la respaldan como el enfoque en redes colaborativas, el diseño modular y estandarizado y el uso de tecnología accesible (IoT de bajo costo)
Novedad y originalidad	Propone elementos o combinaciones metodológicas que no se han trabajado de forma similar en el país o región.	5	La iniciativa explicada en la propuesta es novedosa ya que no se trata solo de implementar estaciones, sino de cómo hacer que esas estaciones de bajo costo generen datos confiables y sean gestionadas de manera eficiente y perdurable.
Coherencia interna	Existe una relación clara y lógica entre los objetivos, fases, acciones e instrumentos de la propuesta.	5	Existe una relación clara y lógica entre los objetivos, fases, acciones e instrumentos de la propuesta. La estructura presentada demuestra una coherencia metodológica sólida.
Sustento científico	La propuesta está respaldada en marcos teóricos, metodológicos y experiencias previas debidamente referenciadas.	4	La propuesta está conceptualmente bien fundamentada y se basa en una experiencia de indagación práctica significativa. Sin embargo, para afirmar con total seguridad que está "debidamente referenciada" académicamente, se requeriría ver el documento completo con su sección de referencias bibliográficas.
Impacto educativo	La propuesta contribuye a la mejora del proceso pedagógico y la formación	5	Esta propuesta claramente contribuye a la mejora del proceso pedagógico y la

	de conciencia ambiental en las instituciones.		formación de conciencia ambiental en las instituciones de acuerdo a los objetivos y fases mencionadas.
Sostenibilidad	Incluye estrategias de continuidad, mantenimiento y evaluación que aseguran su funcionamiento a largo plazo.	5	Hay varios puntos en la descripción de la propuesta que demuestran que no solo se enfoca en la implementación inicial, sino que ha considerado proactivamente los aspectos necesarios para asegurar la operatividad y monitoreo ambiental a lo largo del tiempo.

Opinión de aplicabilidad

La propuesta no es solo teóricamente sólida, sino que su diseño práctico y su enfoque en la sostenibilidad y la autonomía institucional la hacen altamente aplicable

Nombres y Apellidos	Anyelo Quintero Reyes
Correo Electrónico	anyeloquintero@gmail.com
Título Profesional	Ingeniero de Sistemas
Estudios de Posgrado	Magister en educación
Ocupación y años de Experiencia	Docente – 24 años



Firma

Lugar y fecha: Villavicencio 2 de junio de 2025