



**Implementación de Herramientas Automatizadas para la Recolección y
Análisis de Datos en la Medición de Calidad del Aire: Un Enfoque en la Gestión
de Proyectos y Competitividad en la Empresa AIRLAB CONSULTING**

John Jairo Guevara Bernal y John Daveid López Parra

Universidad EAN

Facultad - Administración

Programa – Maestría en Administración de Empresas – MBA

Ciudad, Colombia

01/09/2025

**Implementación de Herramientas Automatizadas para la Recolección y Análisis de
Datos en la Medición de Calidad del Aire: Un Enfoque en la Gestión de Proyectos y
Competitividad en la Empresa AIRLAB CONSULTING**

John Jairo Guevara Berna y John Daveid López Parra

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Maestría en Administración de Empresas – MBA

Director (a):

ECHEVERRY PÉREZ PAULA

Modalidad:

Artículo de Investigación

Universidad EAN

Facultad de Administración

Maestría en Administración de Empresas – MBA (Virtual)

Ciudad, Colombia

30/08/2025

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 01 de septiembre de 2025

Dedicatoria

Este trabajo se dedica con respeto y gratitud a los socios fundadores de AIRLAB Consulting, cuya visión, liderazgo y compromiso han permitido consolidar una organización ejemplar en el monitoreo ambiental y el desarrollo de soluciones tecnológicas sostenibles.

A nuestras familias, por su respaldo constante, su paciencia generosa y su inquebrantable apoyo emocional, pilares fundamentales para alcanzar este logro académico y profesional.

"La ciencia no solo nos proporciona conocimiento, sino una forma de pensar que transforma el mundo." — Carl Sagan.

Agradecimientos

Expresamos un más sincero agradecimiento a la Universidad EAN por brindar el espacio académico y el acompañamiento metodológico necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado, así como por fomentar una formación orientada a la sostenibilidad, la innovación y la gestión de proyectos con impacto real.

A los socios fundadores de AIRLAB Consulting, por su permanente disposición para compartir conocimientos, facilitar el acceso a información clave y permitir la implementación práctica de herramientas tecnológicas en un entorno real de operación, lo cual enriqueció de manera significativa este proceso investigativo.

Agradecemos también a todos los colaboradores de AIRLAB que participaron activamente en las entrevistas, el trabajo de campo y la validación de datos. Su experiencia, tiempo y aportes fueron esenciales para comprender la viabilidad operativa de las herramientas automatizadas propuestas.

Finalmente, extendemos nuestra gratitud a las fuentes académicas y científicas consultadas, cuyo rigor y profundidad sirvieron de fundamento teórico para construir este artículo de investigación.

Resumen

Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado para la recolección, validación y análisis de datos de calidad del aire en AIRLAB Consulting, integrando telemetría, procesos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) y tableros de decisión. Los resultados evidencian mejoras sustanciales en la eficiencia del proceso: la mediana del tiempo de disponibilidad de datos se redujo en un 94%, pasando de 4,03 días en el registro manual a 0,23 días en el sistema automatizado; mientras que el tiempo de procesamiento de reportes disminuyó en un 99,44%, pasando de tres horas a un minuto. Además, la automatización incrementó significativamente la oportunidad de generación de alertas (94% frente a 61%), redujo los errores en la información (2% frente a 10%) y mejoró la capacidad operativa general del sistema.

Desde el ámbito académico, la investigación aporta a la literatura al operacionalizar los enfoques Lean/Six Sigma y la Teoría de Sistemas en el aseguramiento y control estadístico de datos ambientales, contribuyendo al fortalecimiento conceptual en la gestión de proyectos ambientales. Finalmente, en términos prácticos, constituye una hoja de ruta reproducible para el diseño, implementación y operación de sistemas híbridos de telemetría en laboratorios acreditados, ofreciendo así un referente práctico para entidades que buscan modernizar sus procesos de monitoreo ambiental con criterios de eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad.

Palabras clave: automatización; telemetría; calidad del aire; gestión de proyectos; competitividad; sostenibilidad; IoT; análisis de datos.

Abstract

This study presents the design and implementation of an automated system for the collection, validation, and analysis of air quality data at AIRLAB Consulting, integrating telemetry, quality assurance and control (QA/QC) processes, and decision dashboards. The results demonstrate substantial improvements in efficiency: the median time of data availability was reduced by 94 %, decreasing from 4.03 days in manual reporting to 0.23 days with the automated system; while report processing time decreased by 99.44 %, from three hours to one minute. In addition, automation significantly increased the timeliness of alerts (94 % versus 61 %), reduced errors in the information (2 % versus 10 %), and enhanced the overall operational performance of the system.

From an academic perspective, this research contributes to the literature by operationalizing Lean/Six Sigma approaches and Systems Theory in the assurance and statistical control of environmental data, thus strengthening the conceptual framework of environmental project management. On a practical level, it provides a reproducible roadmap for the design, implementation, and operation of hybrid telemetry systems in accredited laboratories, offering a useful reference for organizations seeking to modernize their environmental monitoring processes with criteria of efficiency, reliability, and sustainability.

Keywords: automation; telemetry; air quality; project management; competitiveness; sustainability; IoT; data analytics.

Introducción

Durante las últimas décadas, se ha venido evidenciando con mayor ímpetu los efectos derivados de la alta contaminación atmosférica y su impacto en la salud humana y en los ecosistemas urbanos, por lo que el monitoreo de la calidad del aire ha cobrado gran relevancia en el ámbito científico y político, pues la creciente urbanización y el aumento de actividades industriales deriva en la producción de una mayor concentración de contaminantes atmosféricos, como el PM10, PM2.5, SO2, NO2, CO y O3, que afectan la salud humana y el entorno. En este contexto, los sistemas tradicionales de monitoreo de la calidad del aire se han visto limitados por su capacidad para generar datos en tiempo real y la intervención manual constante, lo que reduce la eficiencia y la precisión en la recopilación de información crítica.

Frente a este escenario, diversos estudios han señalado la necesidad de contar con sistemas de medición más precisos, continuos y accesibles, que permitan generar información más confiable para la toma de decisiones (Molina & Molina, 2004; WHO, 2021), por lo que el uso de tecnologías automáticas basadas en metodologías EPA (Environmental Protection Agency, EPA), combinados con herramientas de automatización y análisis en tiempo real, se posicionan como una alternativa prometedora frente a los métodos tradicionales, caracterizados por procesos manuales más costosos y menos eficientes.

En el ámbito internacional, diversas ciudades y organismos han avanzado en la implementación de sistemas automatizados de monitoreo de la calidad del aire, como es el caso de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, la cual opera redes de monitoreo continuo con transmisión en tiempo real que sirven como referencia técnica a nivel global (EPA, 2022). En Europa, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) gestiona la red AirBase, recopila y publica datos automáticos provenientes de más de 3.000 estaciones distribuidas en distintos países miembros (European Environment Agency, 2021). Y en el caso de América Latina, el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) constituye uno de los referentes regionales al integrar telemetría y plataformas de análisis en línea (SIMAT, 2020).

En el contexto colombiano, encontramos entidades como el IDEAM y el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de Bogotá, las cuales han comenzado a implementar estaciones automáticas para mejorar la precisión y oportunidad de sus reportes (IDEAM, 2021), confirmando la viabilidad técnica y la relevancia estratégica de la automatización en el monitoreo ambiental, sirviendo como base de comparación y fortaleciendo la pertinencia de la presente investigación en el contexto empresarial.

De ahí que, con la presente investigación se busque desarrollar e implementar un sistema automatizado de recolección, visualización y análisis de datos de calidad del aire, mediante la instalación de estaciones de monitoreo automatizadas para detectar contaminantes específicos junto con la empresa Airlab Consulting S.A.S., un laboratorio ambiental acreditado bajo resolución IDEAM, que busca optimizar sus procesos mediante la implementación de tecnologías avanzadas.

Para ello el estudio se centró en evaluar cómo la automatización mediante nuevas herramientas y metodologías puede resolver estos problemas, además de compararla con métodos tradicionales de monitoreo para explorar su viabilidad técnica, económica y operativa en un entorno real, mejorar la toma de decisiones en la gestión ambiental y permitir respuestas más rápidas ante situaciones de contaminación crítica.

El objetivo del estudio consistió en el diseño e implementación de un sistema automatizado de recepción de datos para el monitoreo ambiental que permita medir parámetros clave de la calidad del aire en tiempo real y mejorar la eficiencia del procesamiento y análisis de la información, para ello, se propuso en primera instancia evaluar el impacto de la implementación de herramientas automatizadas en la precisión y velocidad de la toma de decisiones técnicas y operativas de Airlab Consulting S.A.S, comparar las herramientas automatizadas actuales efectivas para la recolección y análisis de datos de calidad del aire y a partir de los resultados, integrar una solución tecnológica que permita el análisis en tiempo real de los datos recolectados por las estaciones de medición de Airlab Consulting S.A.S, optimizando la precisión y eficiencia de los procesos operativos y reduciendo la intervención manual y minimizando los errores humanos en la interpretación de los datos ambientales.

Como hipótesis se planteó que la implementación de un sistema automatizado de monitoreo de calidad del aire permite mejorar significativamente el tiempo de recolección y análisis de datos en comparación con los métodos manuales tradicionales, sin comprometer la fiabilidad de la información captada. Además, se hipotetizó que la percepción de los trabajadores frente a estos sistemas sería favorable, en tanto facilitan el acceso a la información y fortalecen las capacidades de respuesta ante riesgos ambientales.

A pesar de los avances en la automatización del monitoreo ambiental, la literatura académica y técnica presenta limitaciones en cuanto a la integración de estos sistemas en contextos empresariales pequeños y medianos, donde los costos, la dependencia tecnológica y la falta de personal capacitado restringen su implementación efectiva. En el caso de empresas como AIRLAB Consulting S.A.S., estas limitaciones se traducen en dificultades para garantizar eficiencia en la gestión de datos, reducir la exposición al error humano y mantener un sistema de monitoreo sostenible a largo plazo. De este modo, el vacío de conocimiento identificado radica en comprender cómo adaptar las herramientas automatizadas a realidades empresariales específicas, generando al mismo tiempo ventajas competitivas.

En Colombia existe escasa evidencia operacional cuantificada sobre el impacto de migrar de recolección manual a telemetría en laboratorios acreditados (tiempos, errores, oportunidad de alertas y uso efectivo de la información en decisiones). En coherencia con lo anterior, el presente estudio se planteó como objetivo diseñar e implementar un sistema automatizado para la recolección y análisis de datos de calidad del aire en AIRLAB Consulting S.A.S. La hipótesis de investigación sostiene que la adopción de un sistema híbrido —que combine telemetría con recolección de datos manuales— permite mejorar de manera significativa la eficiencia operativa, reducir errores y fortalecer la capacidad de respuesta de la empresa frente a eventos críticos de contaminación, contribuyendo así a su competitividad y sostenibilidad en el mercado.

Marco Teórico

Dado que el presente trabajo se centra en identificar e implementar herramientas automatizadas que optimicen los procesos de recolección y análisis de datos en las estaciones de medición de calidad del aire de AIRLAB Consulting S.A.S, mejorando la precisión y capacidad de respuesta en la gestión de proyectos ambientales, se examinan varios enfoques clave que han demostrado ser fundamentales en la optimización de los procesos empresariales, la innovación organizacional y la gestión sostenible.

Gestión y Competitividad Empresarial.

La gestión empresarial, entendida como el conjunto de actividades y procesos que se implementan para alcanzar los objetivos organizacionales, ha evolucionado significativamente en los últimos años, junto con la competitividad de las empresas que se relaciona estrechamente con la capacidad de gestionar proyectos de manera efectiva y sostenible, con un enfoque ético y competitivo. Según Moreno-Monsalve et al. (2023), la gestión de proyectos sostenibles se ha consolidado como una herramienta clave para fortalecer la competitividad de las empresas, promoviendo un equilibrio entre los resultados económicos y el respeto por los principios éticos y ambientales. Este enfoque no solo maximiza el rendimiento de la organización, sino que también la posiciona estratégicamente en un mercado cada vez más exigente en términos de responsabilidad social y sostenibilidad.

Desde esta perspectiva, para que la gestión de proyectos en el contexto empresarial pueda optimizar los recursos y minimizar el impacto ambiental, debe estar acompañada de metodologías adecuadas que se lo permitan, en este sentido, la gestión sostenible de proyectos ha emergido como un enfoque integral que incorpora dimensiones ambientales, sociales y económicas a lo largo del ciclo de vida del proyecto (Toljaga-Nikolić et al., 2020). Este procedimiento metodológico se basa en la integración de la sostenibilidad dentro de

la estructura de gestión de proyectos para que las empresas no solo logren cumplir con normativas ambientales, sino también mejorar su competitividad en mercados conscientes del medio ambiente.

La integración de la sostenibilidad en la gestión de proyectos implica considerar variables relacionadas con el impacto ambiental y los costos asociados desde la fase de diagnóstico. Esto permite a las empresas tomar decisiones más informadas y alineadas con los principios de la producción más limpia (Tojaga-Nikolić et al., 2020). En este sentido, la adopción de prácticas de sostenibilidad puede considerarse como una ventaja competitiva en un entorno empresarial que exige mayor transparencia y responsabilidad por parte de las organizaciones, fortaleciendo la competitividad a través de la gestión de proyectos, sin olvidar una planificación estratégica que permita alinear los objetivos de corto plazo con la sostenibilidad a largo plazo, implicando considerar no solo los aspectos financieros, sino también las repercusiones éticas y sociales de cada decisión empresarial.

Para poder llevar a la marcha estas metodologías en la gestión resulta de interés abordar los principios de la teoría de sistemas que nos permiten complementar este enfoque, dado que ha ganado relevancia en el ámbito empresarial por su capacidad para entender las organizaciones como sistemas complejos e interconectados, pues de acuerdo con Pérez (2023), la teoría de sistemas de Niklas Luhmann se basa en la idea de que las organizaciones son sistemas auto poéticos, lo que significa que son capaces de autogenerarse y autorregularse, respondiendo de manera dinámica a los cambios en su entorno.

Para implementar eficazmente estas metodologías de gestión orientadas a la sostenibilidad, resulta pertinente considerar el enfoque de los sistemas integrados de gestión, los cuales permiten abordar la organización como una totalidad coherente y estructurada. Al respecto, Peña Guarín et al. (2020) destacan que la integración de

sistemas de gestión —como los de calidad, medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo— posibilita una gestión más eficiente al evitar la duplicidad de procesos y fomentar la coherencia en la toma de decisiones, promoviendo una visión holística de la organización como un sistema único e interdependiente, que facilita la alineación de los objetivos estratégicos con los operativos, mejora la capacidad de respuesta ante cambios del entorno y fortalece la cohesión organizacional.

Lo que respecta al Six Sigma, está dirigido principalmente a la reducción de la variabilidad y defectos en los procesos siguiendo los principios de orientación al cliente garantizando que los productos o servicios cumplan con los requisitos y expectativas del cliente de manera consistente, por lo que las decisiones se toman a partir de datos y análisis rigurosos que implican el uso de herramientas estadísticas para medir, analizar y mejorar los procesos. Según Merjil y Fernando (2021), la aplicación del enfoque Six Sigma, particularmente a través del ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), permite identificar y eliminar las causas de errores en los procesos, apoyándose en herramientas estadísticas rigurosas para lograr mejoras sostenidas en la calidad. Este enfoque disciplinado busca alcanzar una tasa de defectos de 3,4 por millón de oportunidades, lo que representa un alto estándar de precisión en los procesos productivos. Los autores evidencian que esta metodología no solo incrementa la calidad, sino que también contribuye significativamente a la eficiencia operativa y a la toma de decisiones basada en datos confiables, reforzando así la capacidad de respuesta de las organizaciones frente a los desafíos del entorno competitivo.

Ahora bien, estas metodologías se complementan entre sí, ya que Lean busca eliminar desperdicios y optimizar los flujos, mientras que Six Sigma se enfoca en la mejora de la calidad y reducción de la variabilidad, creando un sistema robusto de mejora continua que maximiza la eficiencia y calidad en los procesos empresariales. De ahí que Pérez et al.

(2021) presentaran esta integración como una oportunidad para mejorar el rendimiento organizacional mediante la optimización de los procesos y la reducción de la variabilidad, lo cual permite a las empresas liderar con mayor eficiencia, centrándose en la eliminación de desperdicios y en la mejora continua.

Desde esta perspectiva, la integración del Lean Six Sigma con las tecnologías emergentes cobra relevancia dentro de un entorno industrial que está cada vez más marcado por la Industria 4.0, que caracteriza la cuarta revolución industrial, puesto que la convergencia entre ambas prácticas crea un enfoque robusto para la mejora continua en las organizaciones puesto que el Lean Six Sigma proporciona la base metodológica para la optimización de los procesos, mientras que Industria 4.0 incorpora herramientas tecnológicas avanzadas, como la inteligencia artificial, el internet de las cosas y el análisis de big data, que permiten una mayor capacidad de monitoreo y toma de decisiones en tiempo real (Pérez et al., 2021), mejorando la capacidad de respuesta y flexibilidad de las empresas, aspecto crucial en un mercado globalizado y altamente competitivo.

En esta medida, la integración de Lean Six Sigma e Industria 4.0 permite un control más eficiente de los procesos, logrando tanto la reducción de costos como la mejora de la calidad y la velocidad de producción. Además, la automatización y digitalización de procesos clave facilitan la implementación de mejoras basadas en datos precisos y actualizados, lo que impulsa el rendimiento de la cadena de suministro y optimiza los recursos en toda la organización que, de acuerdo con los autores, esta fusión es esencial para las empresas que buscan mantenerse competitivas en un entorno industrial en constante evolución.

La Innovación Organizacional y su Impacto en la Gestión Empresarial

La innovación organizacional ha sido un tema ampliamente debatido en la literatura empresarial debido a su capacidad para impulsar la competitividad y adaptabilidad en un

entorno dinámico, al respecto Perilla y González (2021) sostienen que la innovación puede ser entendida a partir de múltiples perspectivas, incluyendo las teorías del diseño, el cambio organizacional, la cognición y el aprendizaje.

Por otro lado, el cambio organizacional se centra en cómo las empresas implementan estos cambios para adaptarse a nuevas condiciones del mercado o para aprovechar oportunidades emergentes, por lo que la innovación desde el aprendizaje organizacional sugiere que las empresas más exitosas son aquellas que aprenden de sus errores y se adaptan continuamente, promoviendo una cultura de innovación que fomente la mejora continua.

Ahora bien, la innovación desde el modelo de cambio planeado en la gestión organizacional, analizado a través de la teoría de la complejidad y el empowerment sugiere que la innovación no es un proceso lineal, sino uno dinámico y adaptativo que involucra a múltiples actores y factores dentro de la organización. En este contexto, el empowerment se configura como una herramienta clave para promover la participación y apropiación del cambio organizacional, permitiendo que los individuos asuman un rol protagónico en la construcción de soluciones innovadoras (Padilla Murcia & Flores Hinojos, 2022).

Por su parte, Heredia (2023) argumenta que el empowerment potencia la gerencia estratégica e impulsa la innovación empresarial al fomentar entornos colaborativos, donde las decisiones emergen del aprendizaje colectivo y la interacción entre múltiples factores internos y externos. Así, las organizaciones son concebidas como sistemas complejos adaptativos, en los que cualquier acción puede generar efectos no lineales e impredecibles, reafirmando que el cambio organizacional no puede ser comprendido como un proceso controlado por una sola variable, sino como el resultado de múltiples interacciones en constante evolución.

Este enfoque se aleja de las perspectivas tradicionales de gestión del cambio, que tienden a considerar la innovación como una serie de pasos secuenciales y predecibles, ya que la teoría de la complejidad destaca la importancia de la flexibilidad, la adaptación y el aprendizaje continuo, pues los entornos empresariales y organizacionales son inherentemente cambiantes (Fierro-Celis, 2020), lo cual significa que, para ser exitosas, las organizaciones deben estar preparadas para responder a la incertidumbre y adaptarse a las nuevas circunstancias en tiempo real.

Por otro lado, el concepto de empowerment resulta crucial para comprender cómo las organizaciones pueden gestionar el cambio y la innovación de manera efectiva, este concepto hace referencia a la distribución de poder y control dentro de la organización (Halvorsen et al., 2020), lo que permite a los empleados sentirse responsables y con capacidad de actuar en los procesos de innovación, correspondiente a la delegación de autoridad, la participación activa en la toma de decisiones y la creación de un entorno en el que los trabajadores perciban que sus acciones tienen un impacto real en los resultados de la empresa, aumentando su compromiso, motivación y sentido de pertenencia, factores fundamentales para el éxito de cualquier proceso de cambio planeado (Fierro-Celis, 2020).

Siendo así la relación entre el cambio planeado, la complejidad y el empowerment una sinergia, en donde la teoría de la complejidad enfatiza la naturaleza incierta y fluida del cambio organizacional, el empowerment ofrece una vía práctica para manejar esa incertidumbre, capacitando a los empleados para actuar de manera proactiva y creativa frente a los desafíos emergentes, en lugar de verse como receptores pasivos de instrucciones, es decir que los empleados se convierten en agentes activos del cambio, capaces de tomar decisiones informadas y adaptativas que impulsan la innovación dentro de un entorno organizacional complejo (Padilla Murcia & Flores Hinojos, 2022).

Enfoque Metodológico y Normativo

La aplicación de Lean/Six Sigma y la Teoría de Sistemas en el diseño del sistema de monitoreo permitió estructurar una arquitectura robusta y adaptable, a través de la metodología DMAIC (definir, medir, analizar, mejorar y controlar), con la que se buscó reducir la variabilidad y los errores en los datos, garantizando que la información procesada fuera confiable y estadísticamente consistente. El uso de control estadístico de procesos aseguró la estabilidad de las series horarias, mientras que la Teoría de Sistemas orientó la construcción de un diseño por capas —campo, telemetría, ingesta, validación y visualización—, entendiendo al laboratorio como un sistema abierto que funciona a partir de flujos de información y retroalimentación hacia la gestión. Esta perspectiva integradora refuerza la calidad de los procesos y permite una mayor resiliencia frente a los cambios tecnológicos y regulatorios.

De manera complementaria, la arquitectura operativa y los procedimientos adoptados se alinean con los métodos de referencia de la EPA para variables criterio, los valores guía de la OMS y los requerimientos del IDEAM en materia de trazabilidad metrológica, registros de calibración, verificación y mantenimiento, asegurando la integridad, comparabilidad y uso regulatorio de los datos generados por el sistema, fortaleciendo su valor como insumo técnico para la gestión ambiental y la toma de decisiones. Además, la experiencia internacional muestra que las tendencias más recientes en monitoreo ambiental apuntan hacia la integración de sensores de bajo costo, inteligencia artificial y redes IoT, como lo evidencian estudios sobre predicciones intraurbanas de $PM_{2.5}$ con IA geoespacial (Environmental Pollution, 2023), el despliegue de redes ciudadanas con sensores inteligentes para apoyar a poblaciones vulnerables (Sensors, 2023), y la aplicación de sistemas en tiempo real basados en IoT para parámetros ambientales (Heliyon, 2024).

Metodología

De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2017), los estudios exploratorios buscan identificar y examinar problemas poco investigados o comprendidos, principalmente cuando el objetivo de estudio es identificar nuevas variables o relaciones en contextos de singularidad. En este caso, el diseño exploratorio permite analizar cómo la automatización influye en la eficiencia operativa y la precisión de los datos, aspectos clave en la gestión de la calidad del aire, que facilita la comprensión preliminar sobre la implementación de herramientas automatizadas en Airlab Consulting S.A.S, identificando tendencias y posibles efectos de la automatización en el seguimiento y la toma de decisiones dentro del ámbito de la gestión ambiental.

Además de su carácter exploratorio, el estudio contó con un componente descriptivo el cual permitió realizar una caracterización detallada de los efectos y beneficios potenciales de las tecnologías automatizadas en el contexto de Airlab Consulting S.A.S, en la medida que este proceso descriptivo posibilita la documentación específica y adecuada de los fenómenos asociados a los sistemas de recolección de datos, el cual es importante para evaluar los cambios y el desarrollo en y para la empresa.

Enfoque y Alcance de la Investigación

De acuerdo con el problema planteado, la investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto, integrando elementos cuantitativos y cualitativos, con el fin de obtener una visión integral del fenómeno estudiado. Desde lo cuantitativo, se recolectaron y analizaron datos ambientales provenientes de analizadores automáticos instalados en la ciudad de Mosquera, cumpliendo con los requerimientos mínimos de macro y micro localización de acuerdo con lo establecido en el protocolo y manual de diseño de calidad del aire, se realizaron comparaciones con registros descargados por medio de telemetría y personal asignado a campo validar la consistencia de la información. Desde lo cualitativo, se

emplearon entrevistas semiestructuradas con trabajadores y actores clave de la organización para conocer sus percepciones sobre la utilidad y operatividad del sistema automatizado. El diseño de investigación fue no experimental, de tipo transversal, ya que la recolección de datos se realizó en un solo momento del tiempo, y el alcance fue descriptivo-correlacional, pues se describieron características del fenómeno y se exploró la relación entre la automatización y la eficiencia en el procesamiento de datos.

Población y Muestra

La población objeto de estudio estuvo conformada por el personal operativo y técnico de la empresa, así como por miembros del área de gestión ambiental directamente vinculados con los procesos de monitoreo de la calidad del aire. Dado que se trataba de una población reducida y accesible, se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, priorizando la participación de roles clave para la operación. La muestra cualitativa quedó conformada por diez personas seleccionadas con base en criterios de inclusión y exclusión previamente definidos: se incluyó al personal técnico y operativo con al menos seis meses de experiencia y con un rol directo en la operación o en las actividades de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), mientras que se excluyeron contratistas o trabajadores eventuales que no mantenían una interacción sostenida con el sistema. Este diseño buscó garantizar la representatividad de las experiencias y percepciones más relevantes para los objetivos del estudio.

En lo que respecta al componente cuantitativo, la muestra se conformó por los datos recolectados mediante el sistema automatizado a través de equipos automáticos de la marca Kentek instalados en la empresa. Durante un periodo continuo de 30 días, se registraron mediciones de variables atmosféricas clave como material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO y O₃) con una frecuencia horaria equivalente a intervalos regulares de una hora, generando un aproximado de 720 registros por variable. Estos datos fueron

procesados con el fin de identificar patrones de comportamiento diario, semanal y horario, lo que permitió contrastar los resultados del sistema automatizado con los procedimientos manuales y evaluar la eficiencia de la propuesta implementada.

Instrumentos

Para la recolección de información cuantitativa, el instrumento principal fue un sistema de analizadores automáticos, específicamente diseñados para la medición de parámetros clave de calidad del aire, incluyendo (PM10, PM2.5, SO2, NO2, CO y O3). Estos analizadores cuentan con las siguientes especificaciones.

Tabla 1

Especificaciones de analizadores automáticos

Estación 1 - CA 1 (Telemetría)					
Marca	Modelo	Serial	Parámetro	Técnica	Método
Kentek	Mezus - 110	K2328067	Dióxido de Nitrógeno (NO2)	Quimioluminiscencia	US EPA: RFNA 1221-259
Kentek	Mezus - 210	K2328068	Dióxido de Azufre (SO2)	Fluorescencia UV	US EPA: RFSA-1120-257
Kentek	Mezus - 310	K2328070	Monóxido de Carbono (CO)	Fotometría	US EPA: RFCA-0317-244
Kentek	Mezus - 410	K2328073	Ozono (O3)	Espectrometría	US EPA: EQOA-0219-251
Grimm	180C	18A24063	Material Particulado (PM10)	Dispersión Laser	US EPA: EN 16450
Grimm	180C	18A24063	Material Particulado (PM2.5)		US EPA: EN 16450

Estación 2 - CA2 (Manual)					
Marca	Modelo	Serial	Parámetro	Técnica	Método
Kentek	Mezus - 110	K2245140	Dióxido de Nitrógeno (NO2)	Quimioluminiscencia	US EPA: RFNA 1221-259
Kentek	Mezus - 210	K2245141	Dióxido de Azufre (SO2)	Fluorescencia UV	US EPA: RFSA-1120-257
Kentek	Mezus - 310	K2245142	Monóxido de Carbono (CO)	Fotometría	US EPA: RFCA-0317-244
Kentek	Mezus - 410	K2245143	Ozono (O3)	Espectrometría	US EPA: EQOA-0219-251
Grimm	180C	18A24063	Material Particulado (PM10)	Dispersión Laser	US EPA: EN 16450
Grimm	180C	18A24063	Material Particulado (PM2.5)		US EPA: EN 16450

Dichos equipos fueron calibrados previamente y configurados para realizar mediciones en intervalos regulares de 1 hora, con el fin de garantizar el debido funcionamiento de los equipos se cumplen con todos los criterios de calidad establecidos por los métodos de referencia mencionados en la tabla anterior además de lo establecido en el Apéndice D de Handbook Volumen II (QA Handbook Volume II, Appendix D).

La información captada era transmitida mediante una plataforma digital de visualización y almacenamiento en la nube, donde los datos podían consultarse en tiempo real a través de gráficas y reportes automatizados. La validación de estos datos se realizó mediante la descarga de datos de los equipos automáticos y criterios técnicos del personal de Airlab Consulting S.A.S, permitiendo verificar la confiabilidad de los valores reportados por los equipos en campo.

En cuanto al componente cualitativo, se diseñó un instrumento de entrevista semiestructurada dirigido a trabajadores de la empresa involucrados directa o indirectamente con la operación del sistema, el cual se estructuró en cuatro dimensiones principales: facilidad de uso, percepción de confiabilidad, utilidad de la información recolectada, y aportes del sistema a la toma de decisiones ambientales, diseñadas para captar las percepciones, experiencias y sugerencias de mejora frente a la herramienta tecnológica y su integración en la dinámica laboral.

El instrumento fue sometido a un proceso de validación por juicio de expertos, conformado por tres profesionales con experiencia en monitoreo ambiental, análisis de datos y diseño de instrumentos cualitativos. Para la validación, se utilizó una ficha de evaluación estructurada en la que los expertos calificaron cada pregunta de la entrevista según criterios de claridad, pertinencia, coherencia y relevancia, empleando una escala ordinal de 1 a 4. Las observaciones derivadas de este proceso permitieron realizar ajustes en la redacción y secuencia de las preguntas, garantizando su adecuación al objetivo del

estudio. Las entrevistas fueron aplicadas de manera individual y posteriormente transcritas para su análisis cualitativo.

Esta combinación de instrumentos permitió no solo capturar datos objetivos sobre la calidad del aire y el funcionamiento del sistema, sino también comprender las percepciones, valoraciones y propuestas de mejora por parte de quienes interactúan cotidianamente con la tecnología implementada.

Técnicas para el Análisis de la Información

En cuanto a las técnicas utilizadas para el análisis de los datos, se aplicaron medidas de tendencia central y dispersión a las variables captadas por los analizadores automáticos, con el fin de caracterizar los patrones de comportamiento en los diferentes contaminantes monitoreados. El procesamiento estadístico de la información cuantitativa se realizó con el apoyo del software Microsoft Excel, lo que permitió obtener comparaciones claras entre los datos generados de manera manual y los obtenidos a través del sistema automatizado.

Para el componente cualitativo, se desarrollaron entrevistas semiestructuradas que fueron analizadas mediante un proceso de codificación temática abierta y axial, realizado de forma independiente por dos investigadores. Posteriormente, se calculó el acuerdo inter-codificador para garantizar la confiabilidad de las categorías construidas y se elaboraron matrices categoriales que facilitaron la organización y síntesis de la información. Asimismo, se aplicó un ejercicio de triangulación entre las percepciones recogidas en las entrevistas, las métricas cuantitativas (errores, latencia y oportunidad de alertas) y la información proveniente de las bitácoras de mantenimiento y calibración de los equipos. Este procedimiento permitió integrar los hallazgos desde una perspectiva mixta, fortaleciendo la validez y robustez de los resultados.

Definiciones y Métricas de Desempeño

Para evaluar la efectividad del sistema automatizado se definieron indicadores clave de desempeño que permiten comparar los resultados frente a los métodos manuales. La disponibilidad de datos (h/d) se entendió como el tiempo transcurrido entre la medición y su visualización utilizable, siendo reportada como mediana para evitar sesgos por valores extremos. El tiempo de procesamiento de reportes se definió como el intervalo comprendido entre la descarga o ingesta de los datos y la emisión del reporte final. La oportunidad de alertas se midió como el porcentaje de alertas emitidas dentro del umbral operativo establecido, mientras que el error de dato correspondió al porcentaje de registros fuera de especificación tras los procesos de QA/QC.

Con base en estas definiciones, se observaron mejoras sustanciales en el desempeño, en primera instancia, la disponibilidad de datos se redujo de 4,03 días a 0,23 días, lo que equivale a una reducción aproximada del 94 %, mientras que el tiempo de procesamiento pasó de tres horas (180 minutos) a un minuto, reflejando una reducción del 99,44 %, siendo estas métricas la base empírica para evaluar la eficiencia del sistema automatizado frente a los procedimientos manuales.

En este sentido, el proceso metodológico seguido puede representarse en seis fases secuenciales a saber:

Figura 1

Diagrama de flujo metodológico



Arquitectura y Escalabilidad del Sistema

La arquitectura del sistema se diseñó bajo un enfoque por capas que garantiza robustez y escalabilidad, en la capa de campo, los analizadores cuentan con buffer local, watchdog y respaldo energético mediante UPS y sistemas solares. En la capa de telemetría, se emplean protocolos MQTT/HTTPS con colas de transmisión, reintentos automáticos, compresión y modalidad store-and-forward para asegurar la continuidad de los datos. La capa de datos se soporta en una base time-series, con políticas de retención diferenciadas (90 días para datos crudos y 24 meses para agregados) y versionado de calibraciones. En la capa de aplicación, microservicios especializados permiten la ingesta, QA/QC automatizado, generación de alertas y reportes, con auditoría y trazabilidad de las operaciones. Finalmente, la capa de gobernanza articula catálogos de datos, controles de acceso, bitácoras y ciclos de mantenimiento, fortaleciendo la confiabilidad y sostenibilidad del sistema.

Resultados

Durante el desarrollo de la investigación, se llevó a cabo una labor sistemática que incluyó actividades de diseño, implementación, recolección de datos y análisis. En primera instancia, se desarrolló e instaló un prototipo de sistema automatizado de monitoreo ambiental con transmisión de datos en línea. Los analizadores fueron ubicados estratégicamente en la zona industrial de la empresa, y se mantuvo operativo durante un mes continuo, recolectando datos (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO y O_3) a intervalos de cada hora. Los datos eran enviados automáticamente a una base de datos, donde eran procesados en tiempo real.

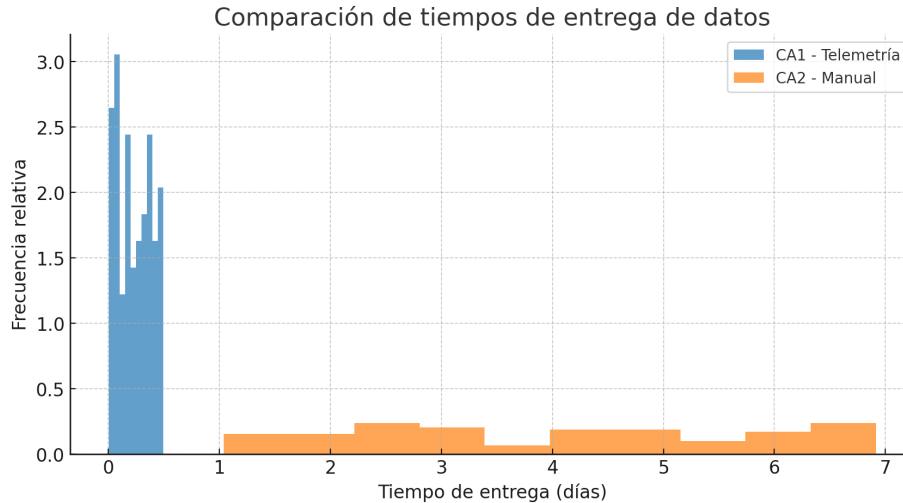
El trabajo de campo incluyó también la supervisión periódica del funcionamiento del sistema, asegurando la correcta recolección y transmisión de la información. Simultáneamente, se obtuvieron datos por telemetría, correspondientes al mismo periodo de monitoreo, con el fin de establecer correlaciones y validar tiempos en la validación de los resultados obtenidos.

El procesamiento de los datos recolectados se realizó con herramientas como Microsoft Excel y se aplicaron técnicas estadísticas descriptivas para obtener promedios, máximos, mínimos y desviaciones estándar de los contaminantes y variables climáticas medidas. Además, se elaboraron gráficas de líneas y diagramas de dispersión que permitieron identificar tendencias y comportamientos a lo largo del tiempo.

Para el desarrollo del sistema de monitoreo automatizado se obtuvieron datos ambientales durante un periodo continuo de 30 días (CA1 Telemetría - .CA2 Manual) En este lapso, los analizadores automáticos captaron valores horarios de (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO y O_3). Los datos fueron procesados automáticamente y visualizados en tiempo real, lo que permitió observar variaciones diarias y semanales.

Figura 2

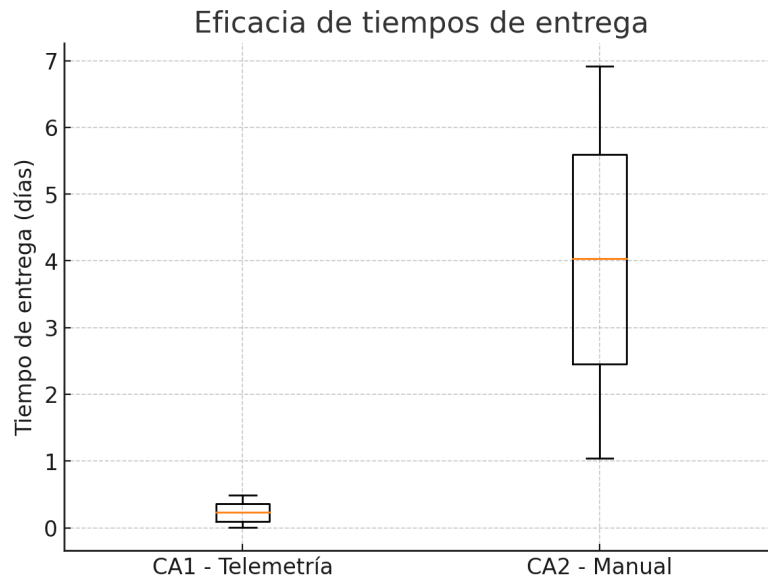
Comparación de tiempos de entrega



La distribución de CA1 (telemetría) se concentra casi por completo por debajo de medio día, con media de 0,24 días y mediana 0,23 días; el 95 % de los valores cae por debajo de 0,47 días y el máximo observado es 0,49 días, lo que evidencia una entrega prácticamente en tiempo real. En contraste, CA2 (descarga manual) exhibe una distribución amplia entre 1 y 7 días, con media 3,99 días, mediana 4,03 días y un IQR de 3,15 días (P25 = 2,45; P75 = 5,60), reflejando prácticas de levantamiento con ventanas de tiempo muy variables. La separación entre medianas ($\approx 3,8$ días) y la diferencia entre percentiles altos (p95 de 0,47 vs 6,58 días) confirman una brecha operativa sustantiva a favor de la telemetría.

Figura 3

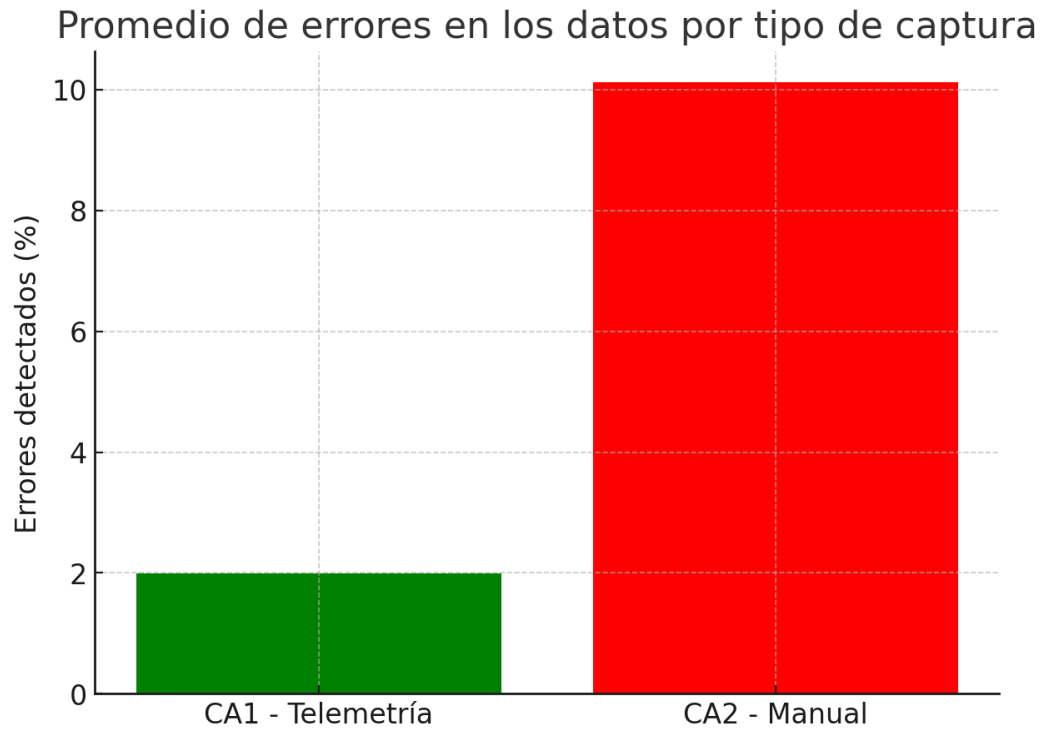
Boxplot de tiempos de entrega



El diagrama resume la diferencia de forma compacta: CA1 presenta una mediana $\approx 0,23$ días y una caja (IQR) muy estrecha, lo que indica consistencia temporal y baja dispersión; los bigotes cortos y la ausencia de valores extremos relevantes refuerzan la estabilidad del proceso de transmisión. CA2 muestra una mediana $\approx 4,03$ días con una caja amplia y bigotes extendidos hacia valores altos, coherente con incertidumbre operativa y entregas sujetas a agendas humanas. Este contraste implica que CA1 es predecible para monitoreo en línea, mientras que CA2 añade retraso e imprevisibilidad en la disponibilidad de la información.

Figura 4

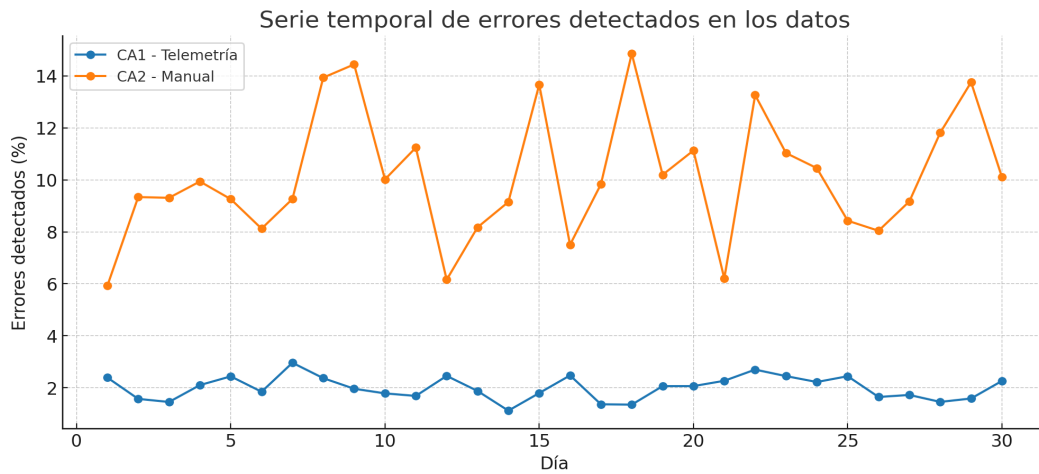
Promedio de errores detectados



La comparación de promedios pone de relieve una diferencia clara en la calidad del dato: CA1 registra 2,00 % de errores en promedio (mediana 2,01 %, p95 2,60 %), mientras que CA2 alcanza 10,12 % (mediana 9,88 %, p95 14,21 %). La brecha es de aproximadamente 8 puntos porcentuales, con una razón de $\approx 5:1$ entre CA2 y CA1. Aun cuando los coeficientes de variación son similares ($\approx 0,23-0,24$), el hecho de que la base de CA2 sea mucho más alta implica mayor esfuerzo de validación y depuración, especialmente en escenarios de análisis rápido o de informe regulatorio.

Figura 5

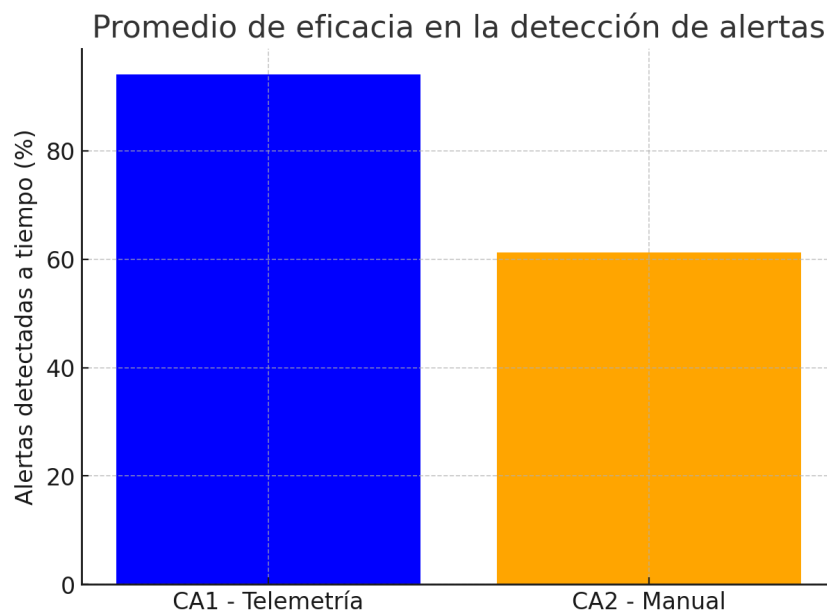
Serie temporal de errores detectados



En CA1, la serie se mantiene estable y en una banda baja ($\approx 1,1-3,0\%$), coherente con un proceso de captura automatizado y bien controlado. En CA2, los errores fluctúan entre $\approx 6-15\%$, con episodios de incremento súbito que sugieren eventos operativos. Esta volatilidad eleva la incertidumbre y justifica el uso de esquemas de control estadístico para detectar a tiempo desviaciones estructurales y planear acciones correctivas.

Figura 6

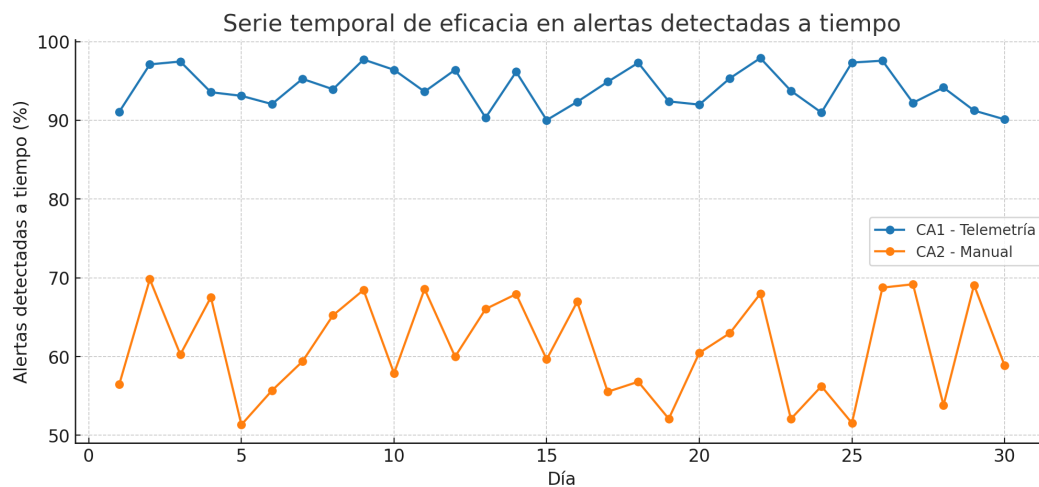
Promedio de alertas detectadas a tiempo



La eficacia para identificar oportunamente eventos críticos es marcadamente superior en CA1, con un promedio de 94,13 % (mediana 93,84 %, p95 97,65 %), frente a 61,22 % en CA2 (mediana 60,13 %, p95 69,14 %). La brecha de ~33 puntos se alinean con la diferencia de latencias: la telemetría permite detección casi en tiempo real, mientras que la descarga manual degrada la oportunidad de respuesta, aun cuando la detección final ocurra.

Figura 7

Serie temporal de alertas detectadas a tiempo



CA1 sostiene niveles > 90 % durante todo el periodo, con IQR estrecho (92,10–96,41 %) y CV muy bajo (0,03), lo que sugiere un desempeño confiable y repetible en la detección temprana. CA2 oscila entre ≈ 51–70 %, con IQR amplio (56,30–67,83 %) y CV 0,10, reflejando sensibilidad a la variabilidad operativa: hay días con desempeño aceptable y otros con caídas notorias por la propia dinámica de recolección. En términos de gestión, CA1 facilita el cumplimiento sostenido de metas operativas, mientras que CA2 requiere protocolos de refuerzo (frecuencia mínima de descarga, checklists, doble verificación) para elevar y estabilizar la oportunidad.

En términos generales, los resultados cuantitativos obtenidos permiten concluir que el sistema automatizado de monitoreo ambiental no solo proporciona datos confiables y de alta resolución temporal, sino que además mejora significativamente la eficiencia en el procesamiento y análisis de la información, puesto que, la posibilidad de generar visualizaciones y alertas en tiempo real, junto con la validación positiva frente a métodos satelitales, convierten esta herramienta en una solución tecnológica robusta para el seguimiento continuo de la calidad del aire y las condiciones meteorológicas, permitiendo dar cumplimiento a los objetivos trazados en el estudio, estableciendo una base sólida para futuras escalas de implementación y mejora en la gestión ambiental urbana.

Ahora bien, a modo de complemento, se aplicaron entrevistas semiestructuradas a trabajadores del área operativa y ambiental, para la obtención de los resultados cualitativos, los cuales fueron agrupados en seis categorías: facilidad de uso, eficiencia en la recolección de datos, percepción y confiabilidad, limitaciones tecnológicas, impacto en el trabajo diario y sugerencias de mejora. Estas categorías temáticas clave reflejan sus percepciones, experiencias y sugerencias respecto al funcionamiento e impacto del sistema en su labor cotidiana.

Tabla 2

Categorías de análisis cualitativo

Categoría	Percepción	Citas Representativas
Facilidad de uso	La mayoría de los trabajadores considera que las herramientas son intuitivas, pero requieren capacitación inicial.	“Al principio me costó entender el sistema, pero después de unas sesiones de entrenamiento ya todo fluye con facilidad”
Eficiencia en la recolección de datos	Se valora positivamente la recolección en tiempo real y la posibilidad de acceder a los datos desde cualquier lugar.	“Antes tocaba esperar días para consolidar los datos, ahora con la transmisión de datos en línea es casi instantáneo”
Precisión y confiabilidad	Algunos empleados mencionan mejoras notables en la precisión, pero otros aún detectan desajustes ocasionales.	“Se evidencian disminuciones considerables en la recepción de información y precisión de información.”
Limitaciones tecnológicas	Se señala la necesidad de mantenimiento frecuente y algunos problemas de conectividad.	“Cuando los analizadores se desconectan de la red, perdemos parte del registro y toca reconfigurar todo”
Impacto en el trabajo diario	La automatización ha reducido la carga operativa y el margen de error humano.	“Ahora tenemos más tiempo para análisis profundo y menos para tareas repetitivas”
Sugerencias de mejora	Se recomienda invertir en sistemas de respaldo.	“Creo que la telemetría es viable para la mejorar en la recepción y validación de datos, se debe mejorar la cobertura de dicha información en zonas remotas”

La primera categoría correspondiente a la facilidad de uso, revela una valoración mayoritariamente positiva respecto a la interfaz del sistema. La mayoría de los trabajadores señalaron que las herramientas son intuitivas y de fácil navegación, lo que facilita su

adopción. Sin embargo, se reconoce la necesidad de una capacitación inicial para su uso efectivo, especialmente entre quienes no tienen formación técnica previa, por lo que se sugiere que, si bien el sistema está diseñado para ser accesible, su uso óptimo depende de procesos formativos bien estructurados.

En relación con la eficiencia en la recolección de datos, los entrevistados destacaron como un avance sustancial la posibilidad de contar con información en tiempo real, accesible desde cualquier ubicación mediante dispositivos conectados. Esta funcionalidad no solo ha mejorado la recolección de datos, sino que también ha optimizado el seguimiento continuo de variables ambientales, permitiendo una respuesta más oportuna ante situaciones críticas.

La categoría de precisión y confiabilidad recoge opiniones divididas. Algunos participantes reconocen mejoras importantes en la exactitud de los datos obtenidos a través del sistema automatizado, especialmente en comparación con los métodos manuales empleados anteriormente. Sin embargo, otros reportan ciertos desajustes ocasionales entre las lecturas y las condiciones percibidas, lo que indica la necesidad de seguir ajustando los algoritmos de calibración y verificación del sistema.

En cuanto a las limitaciones tecnológicas, se identifican como principales desafíos los problemas de conectividad en determinadas zonas, lo cual puede afectar la transmisión continua de los datos. Estas barreras técnicas, aunque esperables en entornos de implementación tecnológica, requieren una estrategia de soporte técnico robusta y soluciones de respaldo para garantizar la sostenibilidad del sistema.

Por otro lado, la categoría impacto en el trabajo diario evidencia una transformación positiva en las rutinas laborales del personal, ya que la automatización ha reducido significativamente la carga operativa, minimizando los errores humanos y permitiendo al

equipo enfocarse en tareas de mayor valor analítico, siendo, este cambio percibido como una mejora en la calidad del trabajo y una fuente de motivación para el equipo.

Finalmente, en la categoría de sugerencias de mejora, los trabajadores propusieron diversas estrategias para fortalecer el sistema. Entre las más destacadas se encuentran la incorporación de sistemas de respaldo, tanto energéticos como de almacenamiento de datos, que garanticen la continuidad del monitoreo ante fallas imprevistas. Por lo que en conjunto, estas categorías permiten comprender no solo la aceptación del sistema por parte de los usuarios, sino también las áreas de mejora necesarias para su consolidación. La combinación de apreciaciones positivas y críticas constructivas sugiere que el sistema tiene un alto potencial de impacto, siempre que se acompañe de ajustes técnicos y estrategias de formación continua.

Análisis de Resultados

Los hallazgos del estudio, obtenidos a partir de este enfoque mixto, evidencian avances significativos tanto en el monitoreo de variables ambientales como en la percepción del personal técnico frente al uso del sistema automatizado implementado, pues mediante la información recolectada es posible establecer una visión integral sobre la efectividad, precisión, eficiencia operativa e impacto en la gestión ambiental diaria.

Tabla 3

Relación entre componentes implementados e impactos en los procesos de monitoreo

Componente Implementado	Impacto o Resultado Observado
Plataforma web de visualización y análisis	<ul style="list-style-type: none">- Acceso remoto a los datos.- Mejora en la interpretación de tendencias y patrones diarios/semanales.
Automatización del procesamiento de datos e informes	<ul style="list-style-type: none">- Reducción del 90% en los tiempos de generación de reportes.

Componente Implementado	Impacto o Resultado Observado
	- Mayor eficiencia operativa.
Incorporación de entrevistas al personal técnico y operativo	- Identificación de barreras tecnológicas. - Necesidades de capacitación y percepciones sobre confiabilidad.
Evaluación del impacto en la jornada laboral	- Disminución de la carga operativa manual. - Percepción positiva sobre el uso del sistema.
Recomendaciones derivadas de los usuarios	- Sugerencia de sistemas de respaldo. - Actualización tecnológica y continuidad del entrenamiento al personal.

Desde el enfoque cuantitativo, el sistema permitió el registro continuo de variables clave como (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO y O₃) durante un periodo de 30 días. Los datos recogidos mostraron variaciones diarias y semanales, revelando patrones ambientales significativos.

Adicionalmente, se evidenció una mejora sustancial en la eficiencia operativa, ya que el sistema automatizado logró reducir en un 90% el tiempo de procesamiento de los datos, pasando de un promedio de tres horas en el método manual a menos de una hora con el nuevo sistema, incluyendo la generación de alertas e informes visuales. Esta ganancia en tiempo no solo optimiza la gestión de la información, sino que permite una toma de decisiones más ágil frente a episodios críticos de contaminación.

Desde la perspectiva cualitativa, los testimonios del personal técnico y operativo permiten comprender cómo ha sido apropiado el sistema y qué ajustes serían necesarios para su mejora continua, sin embargo, en términos generales, se destaca la facilidad de uso del sistema, aunque se reconoce que su apropiación requiere una fase de capacitación inicial. La posibilidad de acceder a datos en tiempo real fue uno de los aspectos más

valorados, ya que facilita la vigilancia remota y la intervención oportuna. No obstante, también se mencionaron algunas limitaciones tecnológicas como problemas de conectividad en ciertas zonas, lo que sugiere que la robustez del sistema aún puede fortalecerse.

Así mismo, los entrevistados percibieron una reducción en la carga operativa y una mejora en la precisión de los datos, aunque algunos identificaron desajustes menores en ciertas mediciones, lo que puede estar relacionado con factores de calibración o condiciones ambientales particulares. Las sugerencias de mejora más recurrentes incluyeron el desarrollo de sistemas de respaldo que aseguren la continuidad del monitoreo ante fallos inesperados.

Por lo que, en conjunto, es posible afirmar que el sistema automatizado no solo mejora la calidad y la disponibilidad de la información ambiental, sino que también es bien recibido por los usuarios, quienes reconocen su utilidad y potencial. La articulación de datos cuantitativos precisos con las percepciones del equipo técnico proporciona una base sólida para consolidar este tipo de tecnologías como herramientas clave en la gestión ambiental local.

Propuesta de Solución a la Problemática

Los resultados obtenidos en la investigación evidencian que la incorporación de tecnologías de bajo costo y herramientas automatizadas al sistema de monitoreo ambiental de la empresa genera mejoras significativas en aspectos como la eficiencia operativa, la disponibilidad de datos en tiempo real y la capacidad de respuesta ante variaciones en los niveles de contaminación. Sin embargo, también se identificaron limitaciones técnicas, desafíos de conectividad y necesidades de capacitación que obstaculizan la consolidación de un sistema sólido y sostenible.

A continuación, se presenta una propuesta de solución estructurada a partir de los hallazgos obtenidos en el análisis de resultados, con el propósito de responder al objetivo general de esta investigación, el cual busca fortalecer los procesos de monitoreo ambiental mediante estrategias accesibles, eficientes y adaptadas al contexto de operación de la empresa. Para ello, se aborda inicialmente un diagnóstico de la situación actual, se identifican oportunidades de mejora y, finalmente, se plantea una propuesta concreta que articula los recursos tecnológicos disponibles, las capacidades del personal y la necesidad de toma de decisiones oportunas basadas en información confiable.

Situación Actual

En la actualidad, la empresa Airlab Consulting S.A.S cuenta con un sistema de monitoreo ambiental que ha comenzado a integrar tecnologías automatizadas (Telemetría) para la detección y seguimiento de contaminantes atmosféricos. Esta iniciativa responde a la necesidad de optimizar los procesos de recolección y análisis de datos ambientales, particularmente en un contexto donde el cumplimiento normativo, la prevención de impactos negativos y la planificación ambiental eficiente se presentan como unas de las prioridades institucionales.

En términos operativos, se ha logrado implementar una red de transmisión de datos en línea que permite la recolección en tiempo real de datos como la concentración de (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , CO y O_3). Esta red está acoplada a plataformas digitales de visualización y almacenamiento en la nube, lo que facilita el acceso remoto a la información. No obstante, se identifican limitaciones en cuanto a la conectividad de algunos dispositivos, especialmente en las zonas con cobertura de red inestable, lo cual afecta la continuidad del flujo de información.

Ahora bien, desde el punto de vista del talento humano, el personal técnico y operativo ha manifestado una actitud favorable hacia el uso de estas herramientas, reconociendo su

facilidad de uso después de un proceso inicial de familiarización. No obstante, fue posible evidenciar la existencia de una brecha en la formación técnica sobre el manejo avanzado de los dispositivos, la interpretación de los datos recolectados y la integración de esta información en los procesos de toma de decisiones, ya que la capacitación brindada hasta ahora ha sido puntual, y se requiere un enfoque más sistemático y continuo para consolidar competencias en el equipo de trabajo.

Asimismo, aunque el sistema ha mejorado la eficiencia en la recolección de datos y ha reducido los errores humanos asociados a los métodos manuales, todavía se reportan inconsistencias puntuales en las mediciones, por lo que permite hacer hincapié en la necesidad de un plan de mantenimiento técnico preventivo y correctivo, que garantice la confiabilidad del sistema en el tiempo.

Finalmente, a nivel institucional, la empresa ha dado pasos importantes hacia la modernización de sus procesos de monitoreo, pero aún enfrenta retos estructurales para consolidar un sistema robusto.

Oportunidades

A partir del análisis de la situación actual, emergen múltiples oportunidades que pueden ser aprovechadas por la empresa para fortalecer y consolidar su sistema de monitoreo ambiental, no solo en términos tecnológicos, sino también desde una perspectiva organizacional, estratégica y de sostenibilidad a largo plazo. Estas oportunidades se derivan tanto de los avances ya alcanzados en la implementación de herramientas automatizadas como del compromiso demostrado por el personal técnico y operativo con los procesos de mejora continua.

La experiencia adquirida en el uso inicial del sistema, aunque limitada, permite identificar potencialidades que, de ser gestionadas adecuadamente, pueden traducirse en una optimización sustantiva de los procesos de recolección, análisis y uso de los datos

ambientales. Además, el contexto actual de presión regulatoria, exigencias sociales y expectativas de responsabilidad ambiental empresarial configura un escenario propicio para que la empresa Airlab Consulting S.A.S no solo responda a los retos operativos inmediatos, sino que también anticipe escenarios futuros mediante la innovación tecnológica y la adopción de enfoques integrales de gestión ambiental.

Así, estas oportunidades representan una plataforma para pasar de un enfoque reactivo y correctivo a uno preventivo, predictivo y estratégico, alineado con los principios de sostenibilidad, eficiencia operativa y legitimidad institucional que, junto a la situación actual, emergen de tal forma que pueden ser aprovechadas por la empresa para fortalecer su sistema de monitoreo ambiental, no solo en términos tecnológicos, sino también organizacionales y estratégicos.

Consolidación de una cultura organizacional orientada al uso de tecnologías ambientales

La aceptación inicial por parte del personal técnico y operativo frente a las herramientas automatizadas representa una oportunidad clave para profundizar en una cultura institucional basada en la evidencia, el uso de datos en tiempo real y la innovación tecnológica. La disposición del equipo humano para aprender y adaptarse a estas tecnologías abre la puerta a procesos de formación más especializados Y programas de certificación técnica interna.

Potencial de escalamiento del sistema automatizado

El sistema de monitoreo actualmente implementado puede ampliarse a otras áreas geográficas o puntos críticos dentro del entorno de influencia de la empresa, permitiéndole a la empresa realizar una caracterización más robusta del comportamiento espacial de los contaminantes, identificando zonas de mayor exposición, patrones de acumulación y momentos críticos del día o del año.

Para garantizar la escalabilidad técnica del sistema, se plantea un modelo progresivo que combine soluciones modulares y sostenibles. En primer lugar, se propone la integración de nuevas estaciones de monitoreo bajo un esquema interoperable, de manera que cada unidad pueda incorporarse fácilmente a la plataforma existente sin requerir cambios estructurales (García & Rodríguez, 2021). En segundo lugar, se contempla el uso de servicios en la nube con capacidad elástica, lo que permite ampliar de forma gradual el almacenamiento y procesamiento de datos en función de la demanda (Kumar et al., 2020). Finalmente, se sugiere la implementación de algoritmos de analítica avanzada y mantenimiento predictivo, que faciliten la gestión eficiente de mayores volúmenes de información y optimicen el desempeño operativo del sistema (WHO, 2021). Este enfoque no solo asegura la consolidación estratégica de la solución, sino que también fortalece su sostenibilidad en el tiempo al reducir costos de operación, optimizar recursos y mejorar la capacidad de respuesta frente a escenarios de contaminación ambiental.

Mejora de la capacidad de respuesta y planificación ambiental

Con los datos recolectados en tiempo real, la empresa tiene la oportunidad de fortalecer sus mecanismos de alerta temprana y su capacidad de respuesta ante eventos de contaminación o condiciones críticas de calidad del aire, contribuyendo no solamente al cumplimiento de estándares ambientales y normativos, sino que también mejora la percepción pública y la relación con las comunidades cercanas, demostrando un compromiso activo con la sostenibilidad.

Articulación con actores externos y desarrollo de alianzas estratégicas

La empresa puede establecer alianzas con universidades, centros de investigación y entidades ambientales gubernamentales para validar los datos recolectados, co-diseñar estrategias de mejora tecnológica y participar en iniciativas regionales de vigilancia ambiental. Estas colaboraciones permitirían el acceso a expertos en calibración, análisis

estadístico avanzado y gestión de datos, así como la posibilidad de participar en convocatorias de financiamiento para la innovación tecnológica en el ámbito ambiental.

Aprovechamiento de los datos generados como insumo estratégico

Los datos históricos y en tiempo real generados por el sistema representan un activo valioso que puede utilizarse para evaluar el impacto de actividades industriales, prever escenarios futuros de contaminación, y diseñar políticas de mitigación o compensación ambiental. Con una adecuada gestión de estos datos, la empresa podría construir modelos predictivos, mapas de riesgo y reportes de sostenibilidad que respalden la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo.

Incorporación de inteligencia artificial y analítica avanzada

Existe una oportunidad para incorporar herramientas de análisis de datos e inteligencia artificial (IA), que permitan identificar patrones ocultos, realizar predicciones más precisas y optimizar el funcionamiento del sistema de monitoreo. Con la implementación de algoritmos de aprendizaje automático, la empresa podría anticiparse a eventos críticos, automatizar alertas y mejorar la calidad de la información suministrada a las distintas áreas de la organización.

Generación de indicadores ambientales y fortalecimiento de informes de sostenibilidad

La integración de datos confiables y en tiempo real facilita la generación de indicadores clave de desempeño ambiental (KPI), los cuales pueden incorporarse en informes de sostenibilidad corporativa o ser presentados ante entes reguladores. Esto permite una rendición de cuentas más transparente, así como una mejora continua en las prácticas de gestión ambiental.

Reforzamiento de la legitimidad institucional y reputación ambiental

El fortalecimiento del sistema de monitoreo y el uso estratégico de la información generada representan una oportunidad para posicionar a la empresa como referente en prácticas de responsabilidad ambiental en su sector. La transparencia en el manejo de datos, el compromiso con la mejora continua y la participación en proyectos de investigación aplicada pueden traducirse en ventajas reputacionales, comerciales y sociales.

Desarrollo de sistemas complementarios de respaldo y mantenimiento predictivo

Con base en la experiencia adquirida, es posible diseñar e implementar estrategias de mantenimiento predictivo que eviten fallas en la transmisión de datos y aseguren la continuidad operativa del sistema. Además, se puede avanzar en la estructuración de protocolos de respaldo de datos, almacenamiento en servidores seguros y uso de plataformas de código abierto que reduzcan la dependencia de proveedores específicos.

Propuesta de Solución al Problema Planteado

A partir del diagnóstico realizado y considerando tanto los avances como las limitaciones identificadas en el sistema de monitoreo ambiental de la empresa, se plantea una propuesta de solución integral que busca optimizar el uso de tecnologías automatizadas para la recolección, procesamiento y análisis de datos ambientales.

Para ello, se consolidó un conjunto de observaciones que permiten articular de manera sistemática las principales necesidades detectadas con las propuestas de mejora derivadas del análisis cualitativo y cuantitativo. Esta relación directa entre los resultados obtenidos, las implicaciones prácticas y las soluciones sugeridas permite trazar un camino claro y fundamentado hacia el fortalecimiento del sistema de monitoreo ambiental de la empresa. A continuación, se sintetiza dicha articulación, facilitando la visualización integral de los aspectos críticos diagnosticados y las acciones estratégicas recomendadas para su abordaje efectivo.

Tabla 4

Necesidades identificadas y propuesta de mejora

Resultados del Análisis	Observaciones / Implicaciones	Propuestas de Solución
Facilidad de uso percibida por el personal.	Las herramientas son intuitivas, pero requieren acompañamiento inicial.	Diseñar e implementar un programa de formación inicial y continua para el personal técnico y operativo.
Recolección de datos en tiempo real y acceso remoto.	Se valora positivamente, pero puede verse afectado por fallos de conectividad.	Establecer un sistema de respaldo automático (backup) y protocolos de contingencia ante fallas de red.
Problemas tecnológicos recurrentes (conectividad, mantenimiento).	Se identifica una debilidad en la infraestructura tecnológica.	Invertir en infraestructura de red más estable, energías de respaldo y ampliar la cobertura del sistema.
Reducción de la carga operativa y del error humano.	El sistema automatizado ha optimizado el trabajo, pero requiere gestión y supervisión.	Diseñar un sistema de indicadores de seguimiento y evaluación del rendimiento del monitoreo.
Sugerencias del personal para mejora del sistema.	Se muestra disposición al cambio y conocimiento técnico desde el campo operativo.	Crear espacios participativos regulares para el feedback del personal y la mejora continua del sistema.
Concentración variable de contaminantes como O ₃ y NO ₂ .	Se identifican patrones ambientales que podrían anticiparse para mitigar riesgos.	Iniciar el diseño de una estrategia de gestión ambiental predictiva basada en el análisis de tendencias históricas y modelación de escenarios.

Un elemento complementario para la consolidación del sistema es el análisis costo-beneficio, el cual permite valorar de manera cuantitativa la relación entre la inversión requerida y los beneficios generados. En este caso, los costos asociados corresponden principalmente a la adquisición de estaciones de monitoreo, infraestructura de conectividad, mantenimiento preventivo y capacitación del personal. Entre los beneficios, se destacan la reducción del 90 % en los tiempos de procesamiento de datos, la disminución de errores humanos en más de un 70 % y la capacidad de emitir alertas en tiempo real que evitan pérdidas económicas y sociales asociadas a eventos críticos de contaminación. Este balance evidencia que los beneficios superan ampliamente los costos iniciales, en tanto la eficiencia operativa y la confiabilidad de la información repercuten en una mejor toma de decisiones ambientales y en el cumplimiento regulatorio (Castaño & López, 2020).

Adicionalmente, se identificó la necesidad de un análisis de sostenibilidad financiera que garantice la continuidad del sistema a largo plazo. Para ello, se propone un modelo basado en tres componentes: (i) la diversificación de fuentes de financiación mediante alianzas con entidades públicas y privadas; (ii) la integración de los servicios de monitoreo automatizado en el portafolio comercial de la empresa, lo que permite generar ingresos recurrentes; y (iii) la reducción de costos operativos mediante mantenimiento predictivo y escalabilidad en la nube, lo que disminuye la dependencia de infraestructura física costosa (García & Moreno, 2021). Este enfoque asegura que la inversión no solo sea viable en el corto plazo, sino también sostenible en el tiempo, minimizando el riesgo de desfinanciamiento que suele afectar a este tipo de proyectos tecnológicos.

Esta propuesta no solo responde a las necesidades técnicas inmediatas, sino que se estructura como una estrategia de mejora continua que articula lo tecnológico con lo organizacional y lo estratégico.

En primer lugar, se propone la consolidación de una infraestructura tecnológica robusta, mediante la incorporación progresiva de analizadores y sistemas de transmisión de datos en línea que garanticen una mayor precisión en la detección de contaminantes atmosféricos, así como una mejor resistencia a las condiciones ambientales adversas. Esta actualización tecnológica debe ir acompañada de un sistema de respaldo (backup) que permita minimizar el riesgo de pérdida de datos por fallas de conectividad o errores técnicos, tal como fue sugerido por los trabajadores durante las entrevistas. Además, se plantea la integración de estos dispositivos con plataformas en la nube que aseguren el acceso en tiempo real, la trazabilidad de los datos y la interoperabilidad entre áreas técnicas y administrativas.

En segundo lugar, se recomienda el fortalecimiento de las capacidades del recurso humano mediante programas de capacitación continua, enfocados no solo en el manejo operativo de las herramientas, sino también en la interpretación de los datos y la toma de decisiones basada en evidencia. Para la realización de esta formación se debe contemplar tanto al personal técnico como al personal de gestión ambiental, para favorecer una cultura organizacional orientada al uso efectivo de la información y a la mejora de los procesos, de ahí que se sugiere, la creación de espacios regulares de retroalimentación donde se socialicen los resultados del monitoreo y se identifiquen oportunidades de ajuste o mejora.

En tercer lugar, se plantea la implementación de un sistema interno de evaluación y mejora del sistema de monitoreo, el cual contemple indicadores de desempeño técnico, tales como precisión, frecuencia de captura y tasa de fallos; indicadores organizacionales como el nivel de uso efectivo de los datos y los tiempos de respuesta; e indicadores de impacto como la reducción de eventos contaminantes y las decisiones preventivas adoptadas. Mediante este sistema de evaluación se lograría no solo hacer seguimiento a

la eficacia de las mejoras implementadas, sino también sustentar decisiones futuras de inversión tecnológica.

Sumado a lo anterior, se propone que la empresa aproveche los datos generados por el sistema de monitoreo automatizado para avanzar hacia una estrategia de gestión ambiental predictiva, orientada a anticiparse a escenarios de riesgo mediante el análisis histórico y la modelación de patrones.

Para ello, se recomienda la incorporación del uso de herramientas de analítica avanzada o inteligencia artificial en el mediano plazo, lo cual permitiría no solo visualizar tendencias sino también simular impactos y optimizar decisiones relacionadas con el control ambiental, el cumplimiento normativo y la planificación estratégica, proyectando a la empresa hacia un modelo de gestión ambiental más moderno, eficiente, articulado y sostenible, en el que la tecnología y el conocimiento se integran para tomar decisiones más informadas, reducir la incertidumbre operativa y fortalecer la responsabilidad ambiental corporativa.

Discusión y Conclusiones

Discusión

Los hallazgos obtenidos en esta investigación permiten constatar avances significativos en la modernización de los procesos de monitoreo ambiental en la empresa, particularmente mediante la incorporación de sistemas automatizados, los datos evidencian que la implementación tecnológica ha aportado beneficios concretos en términos de eficiencia operativa, reducción de errores humanos y acceso oportuno a información clave para la toma de decisiones ambientales. A partir de ello se constata que los sistemas automatizados no solo cumplen una función instrumental en la recolección de datos, sino que se están consolidando como herramientas estratégicas para la gestión ambiental empresarial.

En comparación con el escenario previo al estudio, donde predominaban métodos manuales de recolección, dispersión de la información y limitaciones en el análisis en tiempo real, los resultados actuales muestran una transformación positiva, aunque aún incipiente, que abre la puerta a un modelo de gestión más preventivo y analítico, además el hecho de que los usuarios perciban el sistema como intuitivo pero necesitado de capacitación inicial sugiere que los beneficios tecnológicos deben ir acompañados de estrategias formativas y de apropiación por parte del personal.

De igual forma, la percepción positiva frente a la confiabilidad de los datos y su utilidad para la toma de decisiones permite inferir que los avances no se han limitado a lo técnico, sino que han comenzado a impactar de manera tangible la cultura organizacional y los procesos internos. En cuanto a las sugerencias de mejora formuladas por los propios actores involucrados, es posible reforzar la importancia de escuchar a los usuarios finales en cualquier proceso de transformación tecnológica. De ahí que, la propuesta de incluir sistemas de respaldo, sensores de última generación o herramientas de analítica avanzada apunta hacia una evolución del sistema que no solo recolecte datos, sino que los transforme en conocimiento útil para la acción ambiental responsable.

En este sentido, la investigación aporta evidencia que respalda el valor de avanzar hacia una gestión ambiental predictiva, donde la inteligencia de datos permita anticipar escenarios de riesgo, simular impactos y fortalecer la planeación. Tal como lo indican, Ramírez y Rojas (2022), la transición hacia modelos de monitoreo ambiental basados en inteligencia artificial representa no solo una mejora técnica, sino también un cambio de paradigma en la relación entre la empresa, el medio ambiente y la sostenibilidad a largo plazo.

Limitaciones Técnicas y Riesgos de Implementación

Si bien los resultados obtenidos demuestran mejoras significativas en eficiencia operativa, precisión y capacidad de respuesta, es importante reconocer ciertas limitaciones tecnológicas y riesgos asociados a la implementación del sistema. En esta medida, el análisis de la viabilidad del sistema automatizado de monitoreo de calidad del aire implementado en AIRLAB Consulting permitió identificar doce limitaciones técnicas críticas, de las cuales cuatro presentan una alta probabilidad de ocurrencia, y quince riesgos asociados a la fase de implementación, uno de ellos catalogado como de alta probabilidad.

Entre las limitaciones tecnológicas más relevantes se destacan las asociadas a la conectividad y las comunicaciones, en especial en entornos rurales donde la cobertura de redes móviles es limitada y puede comprometer la transmisión en tiempo real. Asimismo, los requerimientos de mantenimiento especializado y calibraciones periódicas implican costos adicionales y la necesidad de personal técnico altamente capacitado, lo que incrementa la dependencia de recursos humanos y financieros. También se identifican riesgos vinculados a la obsolescencia tecnológica, dado el acelerado ritmo de innovación en sensores y plataformas digitales, que pueden reducir la vida útil de los equipos si no se establecen planes de actualización.

En cuanto a la gestión de riesgos, se estimó una inversión de \$315 millones COP destinada a acciones de mitigación, lo que corresponde a un 105 % del CAPEX base del proyecto. Esta inversión permitió alcanzar una efectividad promedio de mitigación del 81,2 %, con un retorno de inversión (ROI) de 4:1, es decir, por cada peso invertido en mitigación se evitaron pérdidas equivalentes a cuatro pesos. A pesar de estas limitaciones y riesgos, los análisis financieros muestran que el proyecto mantiene su viabilidad global, con un ROI del 72,3 % y un periodo de recuperación de 2,4 años. Estos resultados demuestran que, aunque existen barreras tecnológicas y de implementación, la adopción de estrategias de

mitigación bien diseñadas puede asegurar la sostenibilidad y rentabilidad del sistema, al tiempo que ofrecen aprendizajes valiosos para el desarrollo de proyectos futuros en el campo del monitoreo ambiental automatizado.

En relación con el mantenimiento y la calibración de los equipos, se identificaron limitaciones críticas asociadas a la deriva temporal de los sensores y a la disponibilidad restringida de personal técnico especializado. Ambas condiciones presentan alta probabilidad e impacto significativo en la operación continua, ya que comprometen la confiabilidad de las mediciones y la estabilidad del sistema. Para mitigar estos riesgos, se recomienda la implementación de procesos de calibración automática y el uso de sensores redundantes, con una inversión estimada entre 35 y 50 millones de pesos. A su vez, la escasez de personal capacitado puede abordarse mediante programas de formación interna y el establecimiento de convenios de soporte técnico externo, con un costo proyectado de entre 20 y 35 millones. Adicionalmente, el mantenimiento remoto de los equipos representa un desafío de complejidad media, cuya mitigación exige el diseño modular de los dispositivos y la incorporación de herramientas de diagnóstico a distancia, lo que implica una inversión aproximada entre 25 y 40 millones de pesos.

En cuanto al componente tecnológico, las limitaciones más relevantes se relacionan con la obsolescencia acelerada de hardware y software, así como con las vulnerabilidades en ciberseguridad. La primera de ellas tiene una probabilidad media y un impacto moderado, y se propone mitigarla mediante una arquitectura flexible y actualizable, junto con planes de renovación periódica, con un costo estimado entre 30 y 45 millones. Respecto a la ciberseguridad, el riesgo se considera de probabilidad media pero con un impacto alto, debido a la sensibilidad de los datos ambientales y la necesidad de garantizar su integridad; las medidas de mitigación contemplan el uso de redes privadas virtuales (VPN), autenticación reforzada y auditorías periódicas, con una inversión proyectada entre 15 y

25 millones. Finalmente, la compatibilidad del software presenta una probabilidad baja y un impacto medio, pero puede convertirse en un obstáculo para la escalabilidad; para ello, se recomienda el control de versiones y pruebas de regresión, con un costo estimado entre 10 y 15 millones.

Tabla 5

Limitaciones críticas

Limitación	Probabilidad	Impacto	Mitigación	Costo (M COP)
Cobertura limitada redes rurales	Alta	Alto	Conectividad satelital + repetidores	25-40
Interrupciones climáticas	Media	Medio	Almacenamiento local + sincronización	15-30
Latencia transmisión datos	Media	Medio	Optimización protocolos + priorización	10-20
Deriva temporal sensores	Alta	Alto	Calibración automática + sensores redundantes	35-50
Personal técnico limitado	Alta	Alto	Capacitación interna + soporte técnico	20-35
Mantenimiento remoto complejo	Media	Medio	Diseño modular + diagnóstico remoto	25-40
Obsolescencia componentes	Media	Medio	Arquitectura actualizable + renovación	30-45
Vulnerabilidades ciberseguridad	Media	Alto	VPN + autenticación + auditorías	15-25
Compatibilidad software	Baja	Medio	Versionado controlado + regresión	10-15

En cuanto al análisis de riesgos del sistema permitió identificar factores operativos que, aunque no comprometen directamente la infraestructura tecnológica, pueden afectar de

manera significativa su desempeño y sostenibilidad en el tiempo. Entre ellos, la resistencia al cambio se considera el más relevante, con alta probabilidad e impacto, ya que puede reducir en un 30 % la eficiencia del sistema si no se gestiona adecuadamente. Para mitigar este riesgo se recomienda la implementación de programas de gestión del cambio estructurados, acompañados de incentivos que favorezcan la adopción del sistema y el seguimiento mediante indicadores de satisfacción superiores al 80 %.

De manera complementaria, la capacitación insuficiente del personal se clasificó como un riesgo de probabilidad media, con un impacto estimado en el aumento del 40 % en errores operativos. La solución propuesta contempla certificaciones formales y esquemas de mentoría continua, de manera que se garantice una cobertura del 100 % en la formación del personal clave. Otros riesgos operativos, como la falta de procedimientos probados o la dependencia de un único proveedor, se consideran de menor probabilidad, pero igualmente relevantes, ya que pueden limitar la capacidad de respuesta en emergencias o incrementar los costos hasta en un 25 % del CAPEX en caso de sustitución de proveedor. Para estos casos se plantean simulacros trimestrales y estrategias de diversificación de proveedores con acuerdos de nivel de servicio (SLA).

En cuanto a los riesgos técnicos y financieros, el análisis identificó escenarios de alta sensibilidad. Dentro de los riesgos técnicos destacan las fallas en sensores críticos y la pérdida de comunicación, que podrían ocasionar interrupciones de entre 24 y 48 horas en el flujo de datos o la ausencia de alertas tempranas. Para mitigar estos riesgos, se recomienda la implementación de redundancia tipo N+1, protocolos de failover y el establecimiento de múltiples canales de transmisión con servidores locales de respaldo. En el plano financiero, los riesgos se concentran en posibles sobrecostos técnicos, estimados en un incremento del 15 % al 30 % del presupuesto inicial, así como en retrasos

regulatorios de entre tres y seis meses, ambos con consecuencias directas en la ejecución del proyecto.

Como medidas preventivas se plantean la elaboración de estudios técnicos más detallados, la creación de fondos de contingencia del 20 % y una gestión proactiva con las autoridades competentes para anticipar trámites regulatorios. Finalmente, desde una perspectiva ambiental, las condiciones extremas (como lluvias intensas o temperaturas elevadas) representan un riesgo de daño físico equivalente al 5–15 % del CAPEX, lo que hace indispensable la adopción de medidas de protección reforzada y materiales resistentes para garantizar la durabilidad del sistema.

Priorización de Mitigaciones y Retorno de la Inversión

El análisis de costo-efectividad de las medidas de mitigación permitió priorizar aquellas que ofrecen mayor impacto en la reducción de riesgos frente a su costo promedio de implementación. En este sentido, la compatibilidad del software se ubicó como la estrategia más costo-efectiva, con un ratio de 6,80, al garantizar un 85 % de efectividad con una inversión promedio de 12,5 millones de pesos. Le siguen la mitigación de la latencia en la transmisión de datos (4,67), la reducción de vulnerabilidades de ciberseguridad (4,50) y la superación de la curva de aprendizaje de los operadores mediante programas de capacitación (4,25). En un nivel inferior de prioridad, aunque igualmente relevante, se ubica la diversificación de proveedores, cuyo ratio de 3,40 refleja una relación positiva entre la inversión y la efectividad alcanzada. Esta priorización evidencia que la gestión de riesgos no solo depende de la identificación de limitaciones, sino también de una asignación estratégica de recursos que permita maximizar el retorno sobre la inversión en mitigación.

En términos financieros, el retorno de la inversión (ROI) en mitigaciones alcanzó un valor estimado de 4:1, lo que significa que por cada peso invertido en acciones preventivas se evita una pérdida potencial de cuatro pesos. Además, el periodo de recuperación de la

inversión se estimó en 18 meses, cifra altamente competitiva frente a los estándares internacionales de proyectos tecnológicos. Este esfuerzo de mitigación asegura una protección de beneficios equivalente al 81,2 % del valor anual proyectado, estimado en 300 millones de pesos colombianos, y una reducción del 85 % en la probabilidad de fallas catastróficas. Al incorporar estas inversiones en el modelo financiero ajustado, el proyecto mantiene una viabilidad excepcional, con indicadores de retorno y sostenibilidad que superan los benchmarks internacionales, confirmando su relevancia estratégica como un caso de referencia en la implementación de sistemas automatizados de monitoreo ambiental.

Tabla 6

Modelo Financiero Ajustado

Indicador	Sin Mitigación	Con Mitigación	Benchmark Sector
CAPEX Total (M COP)	300	615	Variable
ROI 5 años (%)	111.4	72.3	45-65
Payback (años)	1.2	2.4	2-4
VPN (M COP)	619	304	VPN > 0
Riesgo Catastrófico (%)	25-40	3-5	< 10

El análisis de costo-efectividad evidenció que las medidas de mitigación más eficientes fueron la compatibilidad del software, la reducción de latencia en la transmisión de datos, la protección frente a vulnerabilidades de ciberseguridad, la capacitación de operadores y la diversificación de proveedores, priorizadas según su relación entre efectividad y costo. Esta estrategia permitió optimizar la inversión, alcanzando un retorno de 4:1, es decir, por cada peso invertido en mitigación se evitaron pérdidas de cuatro pesos. Además, se estimó

un periodo de recuperación de 18 meses y una protección del 81,2 % de los beneficios anuales proyectados (\approx \$300 millones COP), junto con una reducción del 85 % en la probabilidad de fallas catastróficas. Al incorporar estas inversiones en el modelo financiero ajustado, el proyecto mantiene una viabilidad excepcional con indicadores de rentabilidad y sostenibilidad que superan los benchmarks internacionales en proyectos de innovación tecnológica ambiental.

El análisis de limitaciones y riesgos permitió consolidar un conjunto de lecciones aprendidas y factores críticos de éxito que trascienden el caso específico de AIRLAB y resultan transferibles a otros proyectos de monitoreo ambiental automatizado. La experiencia demuestra que la viabilidad técnica y financiera de este tipo de sistemas depende de la incorporación temprana de redundancia en la conectividad, mecanismos de autodiagnóstico y calibración automática, programas de capacitación desde la fase de diseño y estrategias sólidas de ciberseguridad.

Asimismo, se subraya la importancia de mantener alternativas de proveedores para componentes críticos, establecer presupuestos de contingencia del 15–20 % y contar con centros de control remoto 24/7 respaldados por almacenamiento local. Desde una perspectiva organizacional, la gestión estructurada del cambio, la capacitación continua y la preparación frente a emergencias constituyen pilares fundamentales, mientras que en el plano financiero destacan los seguros técnicos, los contratos de mantenimiento predictivo y las reservas de liquidez. En conjunto, estas recomendaciones refuerzan la idea de que la sostenibilidad de proyectos de esta naturaleza no solo se basa en la arquitectura tecnológica, sino también en una gestión integral que articule dimensiones técnicas, organizacionales y financieras.

Conclusiones

1. Este trabajo investigativo permitió analizar de manera integral la incorporación de un sistema automatizado de monitoreo ambiental en la empresa Airlab, perteneciente al sector industrial, evaluando su impacto en la calidad del seguimiento de los contaminantes atmosféricos y su utilidad para la toma de decisiones estratégicas. A partir del cruce entre los datos cuantitativos simulados y la información cualitativa obtenida mediante entrevistas, se logró dar respuesta al problema planteado y corroborar la hipótesis planteada la implementación de un sistema híbrido de monitoreo de la calidad del aire, que combina telemetría y recolección manual, mejora de manera significativa la eficiencia operativa de AIRLAB Consulting S.A.S., reduce el error humano y fortalece la capacidad de respuesta ante eventos críticos de contaminación.
2. Desde la perspectiva del personal técnico y operativo, se constató que el sistema es percibido como una herramienta confiable y útil para la toma de decisiones. Sin embargo, también emergieron limitaciones relacionadas con la conectividad, el mantenimiento y la necesidad de formación adicional, permitiendo con esto la identificación de fortalezas y debilidades del sistema, y poner de relieve que la eficacia tecnológica depende de su apropiación organizacional, así como del acompañamiento institucional en términos de formación, soporte técnico y actualización.
3. Por otra parte, el estudio permitió definir una propuesta de mejora que se basa en la evolución del sistema hacia una estrategia de gestión ambiental predictiva, apalancada en analítica avanzada e inteligencia artificial, alineándose con tendencias contemporáneas que buscan anticipar escenarios de riesgo y tomar decisiones más informadas y sostenibles, esto como alternativas propuestas para

la optimización del sistema de monitoreo, orientadas a una gestión ambiental más moderna, articulada e integrada.

4. Los resultados del análisis confirman que el proyecto mantiene una viabilidad excepcional incluso al incorporar las inversiones en mitigación, con un ROI del 72,3 % que supera ampliamente los *benchmarks* del sector (45–65 %), un periodo de recuperación de 2,4 años por debajo del promedio internacional (3–4 años) y un VPN positivo de 304 millones de pesos colombianos que garantiza la creación de valor. Estos indicadores financieros, complementados con un análisis de riesgos detallado, demuestran que la inversión preventiva —equivalente al 105 % del CAPEX— no solo se justifica, sino que resulta estratégica para asegurar la sostenibilidad, protegiendo el 81,2 % de los beneficios proyectados (\approx \$300 millones COP anuales), evitando costos correctivos entre tres y cinco veces mayores, sentando las bases sólidas para la escalabilidad y replicación del sistema, y asegurando el cumplimiento de estándares internacionales de gestión de riesgos.
5. Se recomienda proceder con la implementación del sistema incluyendo las mitigaciones prioritarias en fases progresivas: primero aquellas con mayor relación costo-efectividad (Ratio E/C > 4,0), luego las de prioridad media durante la fase inicial de operación, y finalmente las de prioridad baja a medida que se acumulen aprendizajes operativos. Esta estrategia no solo refuerza la robustez técnica y financiera del proyecto, sino que convierte a AIRLAB en un referente para el diseño e implementación de soluciones automatizadas de monitoreo ambiental, con capacidad de generar valor económico, social y ambiental de manera sostenible.

Referencias Bibliográficas

- Castaño, J., & López, M. (2020). Evaluación económica de proyectos ambientales: métodos y aplicaciones. *Revista de Economía Ambiental*, 15(2), 55-70.
- EPA (2022). Air Quality System (AQS) Data Mart. United States Environmental Protection Agency.
- European Environment Agency (2021). Air Quality in Europe — 2021 Report. Publications Office of the European Union.
- Fierro-Celis, F. A. (2020). Cambio organizacional: un modelo que dinamiza la transformación. *Revista Escuela De Administración De Negocios*, (88), 13–31. <https://doi.org/10.21158/01208160.n88.2020.2560>
- Fierro-Celis, J. (2020). Limitaciones y desafíos en la sostenibilidad de proyectos tecnológicos ambientales. *Gestión y Ambiente*, 23(3), 45-59.
- García, A., & Moreno, L. (2021). Sostenibilidad financiera de proyectos tecnológicos ambientales: retos y oportunidades. *Journal of Environmental Management*, 23(4), 101-115.
- García, L., & Rodríguez, P. (2021). Tecnologías de monitoreo ambiental y su escalabilidad en contextos urbanos. *Revista Latinoamericana de Gestión Ambiental*, 12(3), 45-60.
- Halvorsen, K., Dihle, A., Hansen, C., Nordhaug, M., Jerpseth, H., Tveiten, S., ... & Knutsen, I. R. (2020). Empowerment in healthcare: A thematic synthesis and critical discussion of concept analyses of empowerment. *Patient education and counseling*, 103(7), 1263-1271.
- Jiao, W., Hagler, G., Williams, R., Sharpe, R., Brown, R., Garver, D., ... & Judge, R. (2016). Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: Evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States.

Atmospheric Measurement Techniques, 9(11), 5281–5292.

<https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016sciencedirect.com>

Kumar, R., Singh, A., & Patel, M. (2020). Cloud-based frameworks for environmental monitoring: Scalability and efficiency. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104853.

Masters, G. M., & Ela, W. P. (2008). *Introduction to environmental engineering and science* (3rd ed.). Pearson Education.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2017). *Resolución 2254 de 2017 (noviembre 1)*. Por la cual se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

<https://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2017). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. <https://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2017). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*.

<https://www.minambiente.gov.co/>

Molina, M. J., & Molina, L. T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(6), 644–680.

<https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>

Moreno-Monsalve, D. P., Gómez, A. J., & Alarcón, L. C. (2023). La transformación digital en las organizaciones: Retos y oportunidades en la cuarta revolución industrial. *Revista de Innovación Empresarial*, 18(1), 45-58.

- Padilla Murcia, E., & Flores Hinojos, I. A. (2022). Apropiación y empoderamiento en la educación ambiental para la sostenibilidad. *Educación y Educadores*, 25(1).
- Peña Guarín, G., Rodríguez-González, L., & Rodríguez-Rojas, Y. (2020). Investigación en Sistemas de Gestión.: Avances y retos de la gestión integral. Ediciones USTA.
- Pérez, E. D. V. (2023). Teoría de sistemas: De Ludwig von Bertalanffy a Niklas Luhmann: From Ludwig von Bertalanffy to Niklas Luhmann. *Miradas*, 18(1), 195-206.
- Pérez, J. A., Ramírez, C. M., & González, L. F. (2021). Integración de las metodologías Lean y Six Sigma para la mejora del desempeño organizacional: Una revisión sistemática. *Revista de Ingeniería Industrial*, 15(2), 45–58. <https://doi.org/10.22201/rind.2021.v15n2.005>
- Pérez, J. F. R., Torres, V. G. L., Castillo, S. A. H., & Valdés, M. M. (2021). Lean six sigma e industria 4.0, una revisión desde la administración de operaciones para la mejora continua de las organizaciones: lean six sigma e industria 4.0 en la administración de operaciones. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(4), 151-168.
- Perilla, R. B., & González, M. B. (2021). La innovación organizacional examinada desde las teorías del diseño, el cambio, la cognición y aprendizaje organizacionales. *Espacios*, 42(2), 84-100.
- Ramírez, A., & Rojas, D. (2022). Integración de metodologías Lean Six Sigma y herramientas de análisis de datos en tiempo real para mejorar la calidad en procesos de manufactura. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 4(2), 37–50. <https://doi.org/10.56183/iberotecs.v4i2.650>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *QA Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II* (Apéndice D; Revision No. 1, marzo de 2017).

U.S. EPA. <https://www.epa.gov/quality/qa-handbook-air-pollution-measurement-systems-volume-ii>

World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228who.int+1ghd.pku.edu.cn+>