Análisis de la viabilidad de un sistema IoT multifactorial de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, 2026

Modalidad:
Monografía Análisis

Carlos Alberto Caro Vanegas.
1096186642

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Barrancabermeja, 02/06/2026

Análisis de la viabilidad de un sistema IoT multifactorial de bajo costo para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, 2026

Modalidad
Monografía Análisis

Carlos Alberto Caro Vanegas.
1096186642

Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico

DIRECTOR
Ing. Ademyr Arlindo Mármol Castro

Grupo de investigación
DIANOIA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico
Barrancabermeja, 02/06/2026

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por las Unidades Tecnológicas de Santander para optar al título de Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico, según el Acta del Comité de Trabajos de Grado FCNI-269 con fecha: 03/06/2026 evaluado por el Ing. Néstor Alfonso Sandoval Reyes.



Firma del Evaluador



Firma del Director

DEDICATORIA

El presente trabajo de grado se dedica a mi familia, por su apoyo constante durante el proceso de formación académica, y a las Unidades Tecnológicas de Santander por brindar los espacios de aprendizaje necesarios para el desarrollo de competencias en el área tecnológica.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a las Unidades Tecnológicas de Santander por su formación académica y el acompañamiento brindado durante el desarrollo del proceso investigativo.

Se reconoce especialmente al Ing. Ademyr Arlindo Mármol Castro por ser el director del trabajo de grado por su orientación técnica y académica en la estructuración de la propuesta.

Asimismo, se agradece a las entidades relacionadas con el suministro de información sobre calidad del agua en Barrancabermeja, las cuales sirvieron como base para el análisis desarrollado.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS 9
RESUMEN EJECUTIVO 10
PALABRAS CLAVE 10
INTRODUCCIÓN 11
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13
1.2. JUSTIFICACIÓN 15
1.3. OBJETIVOS 16
1.3.1. OBJETIVO GENERAL 16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16
2. MARCO REFERENCIAL 17
2.1. MARCO TEÓRICO 17
2.1.1. Calidad del agua 17
2.1.2. Parámetros de calidad del agua 17
2.1.3. Limitaciones del monitoreo tradicional 19
2.1.4. Tecnologías IoT aplicadas al monitoreo ambiental 20
2.1.5. Modelos matemáticos aplicados al monitoreo 21
2.2. MARCO LEGAL 22
2.3. MARCO CONCEPTUAL 23
2.4. MARCO AMBIENTAL 25
2.4.1. Evaluación de impactos ambientales 26
2.4.2. Análisis de impactos 26
2.4.3. Consideraciones ambientales del sistema 26
2.5. MARCO HISTÓRICO 27
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 29
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 29
3.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN 29
3.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN 30
3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 31
3.4.1. Bases de datos utilizadas 31
3.5. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y DEPURACIÓN 32
3.5.1. Criterios de inclusión 32
3.5.2. Criterios de exclusión 33
3.5.3. Proceso de depuración 33
3.6. VARIABLES DE ANÁLISIS 33
3.7. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS 34
3.7.1. Cálculo del error 34
3.7.2. Índice de eficiencia del sistema 34
3.8. FASES DE LA INVESTIGACIÓN 34
3.8.1. Fase 1: Revisión bibliográfica 35
3.8.2. Fase 2: Selección de información 35
3.8.3. Fase 3: Análisis de información 35
3.8.4. Fase 4: Interpretación 36
3.8.5. Fase 5: Elaboración del documento 36
3.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN 36
3.10. LIMITACIONES DEL ESTUDIO 37

3.11. APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA 37
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO 38
4.1. ANÁLISIS GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO 38
4.2. DISEÑO DE HARDWARE DEL SISTEMA 39
4.3. DISEÑO DE SOFTWARE Y PROCESAMIENTO DE DATOS 39
4.4. MODELO MULTIFACTORIAL DE EVALUACIÓN 40
4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA 41
4.6. ANÁLISIS DE APLICABILIDAD EN DIFERENTES CONTEXTOS 42
4.6.1. Entorno doméstico 42
4.6.2. Entorno comercial 42
4.6.3. Entorno industrial 43
4.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DOCUMENTALES 44
4.8. LIMITACIONES DEL SISTEMA 44
4.8.1. Variabilidad en la precisión de los sensores 44
4.8.2. Dependencia de conectividad 45
4.8.3. Necesidad de calibración periódica 45
4.8.4. Análisis general de las limitaciones 46
4.9. APORTE DEL TRABAJO 46
4.10. SÍNTESIS DEL DESARROLLO 47
5. RESULTADOS 49
5.1. RESULTADOS DE PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DEL SISTEMA 49
5.1.1. Análisis detallado 50
5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIFACTORIAL 50
5.2.1. Análisis detallado 50
5.3. RESULTADOS ECONÓMICOS Y DE COSTO-BENEFICIO 51
5.3.1. Análisis detallado 51
5.4. RESULTADOS DE VIABILIDAD SEGÚN CONTEXTO 52
5.4.1. Análisis detallado 52
5.5. RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA 52
5.5.1. Resultados obtenidos 53
5.5.2. Análisis detallado 53
5.6. RESULTADOS GLOBALES DEL SISTEMA 53
5.6.1. Análisis global 53
5.7. ANÁLISIS DEL ÉXITO DEL TRABAJO 54
5.8. SÍNTESIS DE RESULTADOS 54
6. CONCLUSIONES 55
7. RECOMENDACIONES 57
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 59
9. ANEXOS 62

LISTA DE TABLAS

Tabla No. 1.Evaluación de impactos ambientales del sistema IoT 27

Tabla No. 2.Variables de analisis del sistema LoT 35

Tabla No. 3.Analisis economico del sistema LoT 42

Tabla No. 4.Resultados de precision y confiabilidad del sistema LoT 50

Tabla No. 5.Resultados del análisis multifactorial 51

Tabla No. 6.Resultados economicos y de costo beneficio.....52

Tabla No. 7.Resultado de viabilidad 53

Tabla No. 8.Resultados Globales del sistema.....54

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema basado en tecnologías IoT para el monitoreo multifactorial de la calidad del agua en la ciudad de Barrancabermeja. A diferencia de enfoques tradicionales centrados únicamente en la turbidez, esta investigación incorpora el análisis de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, tales como pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y presencia indirecta de coliformes fecales, con el fin de obtener una evaluación más integral del recurso hídrico.

La metodología empleada corresponde a un estudio de tipo monográfico con enfoque cualitativo y alcance descriptivo, basado en un análisis documental sistemático de literatura científica proveniente de bases de datos académicas reconocidas. Se utilizaron ecuaciones de búsqueda estructuradas mediante operadores booleanos y se aplicaron criterios de selección relacionados con pertinencia temática, actualidad y calidad académica de las fuentes.

Como resultados, se determinó que los sistemas IoT de bajo costo presentan una viabilidad técnica alta en entornos domésticos (80%), media en contextos comerciales (50%) y baja en aplicaciones industriales (35%), debido a las diferencias en los requerimientos de precisión. Asimismo, se evidenció que la turbidez por sí sola representa aproximadamente el 25% de la evaluación total de la calidad del agua, lo que confirma la necesidad de un enfoque multifactorial.

Se concluye que la implementación teórica de sistemas IoT constituye una alternativa viable para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, siempre que se integren múltiples parámetros y se reconozcan sus limitaciones en términos de precisión y confiabilidad frente a sistemas tradicionales.

PALABRAS CLAVE

Internet de las Cosas (IoT), calidad del agua, monitoreo multifactorial, sensores, Barrancabermeja

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la calidad del agua constituye un aspecto fundamental para la protección de la salud pública, el desarrollo sostenible y la preservación de los ecosistemas. A nivel global, organismos como la Organización Mundial de la Salud han establecido lineamientos que destacan la necesidad de evaluar múltiples parámetros físicos, químicos y microbiológicos para garantizar la potabilidad del agua (World Health Organization, 2017). Sin embargo, en muchos contextos locales, especialmente en regiones con actividad industrial y variabilidad ambiental, el monitoreo sigue basándose en indicadores limitados que no reflejan de manera integral el estado del recurso hídrico.

En ciudades como Barrancabermeja, donde confluyen factores como la actividad petrolera, la sedimentación asociada a lluvias y el crecimiento urbano, la calidad del agua puede verse afectada por contaminantes que no son detectables mediante inspecciones básicas. Tradicionalmente, la turbidez ha sido utilizada como uno de los principales indicadores de calidad, debido a su facilidad de medición y su relación con la presencia de partículas suspendidas (García & Rodríguez, 2020). No obstante, diversos estudios han demostrado que este parámetro por sí solo resulta insuficiente para identificar contaminantes químicos y microbiológicos, tales como metales pesados o bacterias patógenas, los cuales representan un riesgo significativo para la salud humana.

En este contexto, el avance de las tecnologías basadas en el Internet de las Cosas (IoT) ha permitido el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental capaces de recopilar, procesar y transmitir datos en tiempo real. Estos sistemas integran sensores electrónicos, microcontroladores y módulos de comunicación que facilitan el seguimiento continuo de diferentes variables, superando las limitaciones de los métodos tradicionales (Alves et al., 2021). Además, el uso de dispositivos de bajo costo ha ampliado las posibilidades de implementación en entornos domésticos, educativos y comunitarios, donde anteriormente no era viable el acceso a tecnologías de monitoreo avanzado.

A pesar de la disponibilidad de múltiples investigaciones sobre sistemas IoT aplicados al monitoreo del agua, existe una brecha en cuanto a su análisis específico en contextos locales como Barrancabermeja, especialmente desde un enfoque multifactorial que integre parámetros físicos, químicos y microbiológicos. La mayoría de propuestas se centran en uno o dos indicadores, lo que limita su

aplicabilidad para una evaluación completa de la calidad del agua. En este sentido, el presente trabajo representa un aporte importante, ya que propone un análisis integral que considera múltiples variables, así como factores técnicos y económicos asociados a su implementación.

El método empleado en esta investigación corresponde a un enfoque teórico basado en análisis documental sistemático, propio de la modalidad de monografía. A través de la revisión de literatura científica, normativa y técnica, se evalúa la viabilidad de un sistema IoT multifactorial sin requerir su implementación física. Este enfoque permite identificar tendencias, limitaciones y oportunidades en el uso de estas tecnologías, así como establecer modelos comparativos que faciliten la toma de decisiones en contextos reales.

En síntesis, este trabajo busca contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas al monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, mediante un análisis riguroso que integra conocimientos de ingeniería, electrónica y gestión ambiental. Su relevancia radica en la posibilidad de generar información útil para futuros desarrollos, así como en la promoción de alternativas accesibles que mejoren el control y la vigilancia del recurso hídrico en el contexto local.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el contexto de Barrancabermeja, el monitoreo de la calidad del agua representa una problemática relevante debido a la interacción de factores ambientales, industriales y tecnológicos que influyen directamente en el estado del recurso hídrico. La ciudad, caracterizada por su actividad petrolera, variabilidad climática y cercanía al río Magdalena, presenta condiciones que favorecen la alteración de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua.

Actualmente, el control de la calidad del agua se realiza principalmente mediante mediciones puntuales y el análisis de parámetros aislados, siendo la turbidez uno de los indicadores más utilizados. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones significativas, ya que la turbidez solo permite identificar la presencia de partículas suspendidas, sin proporcionar información sobre contaminantes químicos como metales pesados ni sobre agentes microbiológicos como coliformes fecales. En términos generales, la turbidez representa aproximadamente el 25% de la evaluación total de la calidad del agua, lo que implica que una gran parte de los riesgos potenciales no son detectados mediante este parámetro.

Desde el análisis de involucrados, se identifican como actores principales la comunidad de Barrancabermeja, las entidades prestadoras del servicio de agua potable, las instituciones académicas y las autoridades ambientales. La falta de acceso a sistemas de monitoreo continuo y multifactorial limita la capacidad de estos actores para tomar decisiones informadas y oportunas frente a posibles eventos de contaminación.

Entre las causas primarias de esta problemática se encuentran:

- La dependencia de métodos tradicionales de medición no continuos.
- El alto costo de los sistemas de monitoreo industrial.
- La limitada integración de tecnologías de bajo costo en el contexto local.

Como causas secundarias se identifican:

- Falta de acceso a tecnologías IoT en entornos domésticos y comunitarios.

- Limitaciones en la cobertura de monitoreo en zonas rurales y periféricas.
- Bajo nivel de apropiación tecnológica en sistemas ambientales.

Los efectos derivados de esta problemática incluyen:

- Detección tardía de contaminantes en el agua.
- Riesgos para la salud pública por consumo de agua no apta.
- Falta de información en tiempo real para la toma de decisiones.
- Incremento en costos de tratamiento correctivo en lugar de preventivo.

En este contexto, surge la necesidad de analizar alternativas tecnológicas que permitan mejorar el monitoreo del agua mediante el uso de sistemas IoT multifactoriales, capaces de integrar múltiples parámetros y proporcionar información continua.

Pregunta de investigación:

¿En qué medida es viable, desde un enfoque documental, la implementación de un sistema IoT multifactorial para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, considerando variables físicas, químicas y microbiológicas, y cómo se relaciona su nivel de precisión y costo con su aplicabilidad en diferentes contextos (doméstico, comercial e industrial)?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica en la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja mediante el análisis de soluciones tecnológicas accesibles, eficientes y adaptadas al contexto local. La problemática identificada evidencia que el uso de indicadores aislados, como la turbidez, no permite una evaluación integral del recurso hídrico, lo que puede generar riesgos para la salud pública y limitaciones en la gestión ambiental.

Desde el punto de vista tecnológico, el desarrollo de sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) representa una alternativa innovadora para el monitoreo continuo de variables ambientales. Estos sistemas permiten la integración de sensores, microcontroladores y módulos de comunicación que facilitan la adquisición y transmisión de datos en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta frente a cambios en la calidad del agua. La implementación de tecnologías de bajo costo, como el ESP32, reduce significativamente las barreras de acceso, haciendo posible su aplicación en entornos domésticos y comunitarios.

En el ámbito económico, la propuesta presenta una ventaja significativa al reducir los costos de implementación en comparación con sistemas industriales tradicionales. Mientras que una estación de monitoreo profesional puede superar los $5.000.000 COP, un sistema IoT multifactorial puede implementarse por menos de $700.000 COP, lo que representa una reducción superior al 85%. Esta diferencia permite ampliar la cobertura de monitoreo y democratizar el acceso a la información sobre la calidad del agua.

Desde la perspectiva social, el desarrollo de este tipo de sistemas contribuye a mejorar la calidad de vida de la población al proporcionar herramientas de monitoreo preventivo que permiten identificar posibles riesgos antes de que se conviertan en problemas mayores. Asimismo, promueve la apropiación tecnológica y el fortalecimiento de capacidades en la comunidad.

En el ámbito ambiental, el monitoreo continuo del agua permite detectar alteraciones en sus características, facilitando la implementación de medidas preventivas que contribuyan a la protección de los ecosistemas. Esto es especialmente relevante en zonas como Barrancabermeja, donde la actividad industrial y las condiciones climáticas pueden afectar la calidad del recurso hídrico.

En el contexto académico, este trabajo aporta al fortalecimiento de las líneas de investigación de las Unidades Tecnológicas de Santander relacionadas con la

automatización, la instrumentación electrónica y el monitoreo ambiental. Además, contribuye al desarrollo de conocimiento aplicado que puede servir como base para futuras investigaciones o proyectos tecnológicos.

Finalmente, la viabilidad del trabajo se sustenta en el acceso a información científica, normativa y técnica que permite realizar un análisis documental riguroso sin necesidad de implementación experimental, lo cual es coherente con la modalidad de monografía.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar, mediante un análisis documental, la viabilidad técnica y económica de un sistema IoT multifactorial para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja, considerando parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ·Analizar los principales parámetros físicos, químicos y microbiológicos utilizados en la evaluación de la calidad del agua.
- Evaluar las tecnologías IoT aplicadas al monitoreo ambiental y su integración en sistemas de bajo costo.
- Comparar los niveles de precisión, costo y confiabilidad de sistemas IoT frente a métodos tradicionales e industriales.
- Determinar la viabilidad del sistema en diferentes contextos: doméstico, comercial e industrial.
- Identificar las limitaciones técnicas y operativas de los sistemas IoT en el monitoreo de la calidad del agua.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

El marco teórico constituye la base conceptual que sustenta el desarrollo del presente trabajo, permitiendo comprender los fundamentos científicos y tecnológicos relacionados con el monitoreo de la calidad del agua mediante sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT).

2.1.1. Calidad del agua

La calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que determinan su aptitud para diferentes usos, tales como consumo humano, uso industrial o conservación ambiental. Según la Organización Mundial de la Salud, la evaluación de la calidad del agua debe considerar múltiples parámetros que permitan identificar contaminantes visibles e invisibles.

En este sentido, la calidad del agua no puede ser evaluada mediante un único indicador, ya que su composición puede verse alterada por diferentes factores como la actividad industrial, la contaminación biológica y las condiciones ambientales.

2.1.2. Parámetros de calidad del agua

Los parámetros de calidad del agua se clasifican en tres categorías principales: físicos, químicos y microbiológicos. Cada una de estas categorías permite evaluar diferentes características del recurso hídrico, proporcionando una visión integral de su estado y su aptitud para distintos usos, como consumo humano, uso industrial o conservación ambiental.

2.1.2.1 Parámetros físicos

Los parámetros físicos incluyen variables observables que permiten identificar cambios en las características visibles y sensoriales del agua. Estos parámetros son generalmente los primeros indicadores de alteraciones en la calidad del agua y pueden medirse de forma relativamente sencilla.

Entre los principales parámetros físicos se encuentran:

- **Turbidez**
- **Temperatura**

La **turbidez** se relaciona con la presencia de partículas suspendidas en el agua, como sedimentos, materia orgánica, microorganismos y otros contaminantes. Un aumento en la turbidez puede indicar contaminación o procesos de erosión, y además puede afectar la penetración de la luz, alterando los ecosistemas acuáticos.

Por su parte, la **temperatura** influye directamente en los procesos químicos y biológicos que ocurren en el agua. Variaciones en este parámetro pueden afectar la solubilidad de los gases (como el oxígeno disuelto), la actividad microbiológica y la velocidad de reacciones químicas. Temperaturas elevadas, por ejemplo, pueden reducir la cantidad de oxígeno disponible para los organismos acuáticos.

2.1.2.2 Parámetros químicos

Los parámetros químicos corresponden a variables que determinan la composición química del agua y permiten identificar la presencia de sustancias disueltas que pueden afectar su calidad y seguridad.

Entre los principales parámetros químicos se encuentran:

- **pH**
- **Conductividad eléctrica**
- **Oxígeno disuelto**
- **Metales pesados**

El **pH** mide el nivel de acidez o alcalinidad del agua en una escala que va de 0 a 14. Valores fuera del rango óptimo pueden indicar contaminación y afectar tanto la vida acuática como la potabilidad del agua.

La **conductividad eléctrica** permite identificar la presencia de sales y minerales disueltos en el agua. Valores elevados pueden indicar contaminación por sustancias inorgánicas o descargas industriales.

El **oxígeno disuelto** es un indicador clave de la capacidad del agua para sustentar vida acuática. Niveles bajos de oxígeno pueden ser consecuencia de

contaminación orgánica o procesos de descomposición, afectando negativamente a los organismos vivos.

Los **metales pesados**, como plomo, mercurio o cadmio, representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente. Su presencia en el agua suele estar asociada a actividades industriales y puede generar efectos tóxicos incluso en bajas concentraciones.

2.1.2.3 Parámetros microbiológicos

Los parámetros microbiológicos permiten evaluar la presencia de microorganismos en el agua, los cuales pueden representar un riesgo directo para la salud humana. Estos parámetros son fundamentales en la determinación de la potabilidad del agua.

Entre los principales indicadores microbiológicos se encuentran:

- **Coliformes fecales**
- **Bacterias patógenas**

Los **coliformes fecales** son utilizados como indicadores de contaminación de origen fecal. Su presencia sugiere la posible existencia de otros microorganismos patógenos, como virus, bacterias y parásitos.

Las **bacterias patógenas** incluyen microorganismos capaces de causar enfermedades, tales como infecciones gastrointestinales. Su detección es fundamental en sistemas de control de calidad del agua, especialmente en fuentes destinadas al consumo humano.

Debido a su naturaleza, estos parámetros suelen requerir análisis de laboratorio o métodos indirectos de detección, lo que representa una limitación para su medición en sistemas IoT de bajo costo. Sin embargo, su inclusión en modelos multifactoriales permite aproximar su impacto dentro de la evaluación global de la calidad del agua.

2.1.3. Limitaciones del monitoreo tradicional

El monitoreo tradicional de la calidad del agua se basa en mediciones puntuales realizadas mediante muestreo manual. Este enfoque presenta limitaciones como:

- Falta de monitoreo continuo
- Retrasos en la obtención de resultados
- Costos elevados
- Baja cobertura geográfica

Además, el uso de parámetros aislados como la turbidez no permite una evaluación integral del agua.

2.1.4. Tecnologías IoT aplicadas al monitoreo ambiental

El Internet de las Cosas (IoT) se define como un sistema de interconexión de dispositivos físicos capaces de recopilar, procesar y transmitir datos a través de redes de comunicación. En el contexto del monitoreo ambiental, el IoT ha permitido el desarrollo de soluciones tecnológicas que facilitan la supervisión continua de variables físicas, químicas y biológicas, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en muestreos puntuales.

La implementación de tecnologías IoT en el monitoreo de la calidad del agua permite obtener información en tiempo real, lo cual mejora significativamente la capacidad de detección temprana de eventos de contaminación y facilita la toma de decisiones oportunas. Además, el uso de dispositivos de bajo costo ha ampliado su aplicabilidad en entornos domésticos, educativos y comunitarios.

Un sistema IoT típico aplicado al monitoreo ambiental está compuesto por los siguientes elementos:

- **Sensores:**
  Son dispositivos encargados de medir variables específicas del entorno, como pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Estos sensores convierten magnitudes físicas o químicas en señales eléctricas que pueden ser procesadas por el sistema.
- **Microcontrolador:**
  Es la unidad de procesamiento del sistema, encargada de recibir las señales de los sensores, procesarlas y gestionar la transmisión de datos. En este trabajo se considera el uso del ESP32, debido a su bajo costo, capacidad de procesamiento y conectividad integrada.
- **Sistema de comunicación:**
  Permite la transmisión de datos hacia plataformas externas. Puede basarse en tecnologías como WiFi, GSM o redes de baja potencia, dependiendo del contexto de implementación y la disponibilidad de infraestructura.

- **Plataforma de visualización de datos:**
  Es el entorno donde se almacenan, procesan y presentan los datos recolectados. Puede consistir en aplicaciones web, plataformas en la nube o interfaces móviles que permiten al usuario monitorear la información en tiempo real.

El uso de estas tecnologías permite la creación de sistemas distribuidos y escalables, capaces de adaptarse a diferentes necesidades y contextos. Sin embargo, su implementación también implica desafíos relacionados con la conectividad, la seguridad de los datos y la precisión de los sensores.

2.1.5. Modelos matemáticos aplicados al monitoreo

El análisis de datos en sistemas IoT requiere la aplicación de modelos matemáticos que permitan interpretar la información obtenida por los sensores y evaluar la calidad de las mediciones. Estos modelos son fundamentales para garantizar la confiabilidad de los resultados y facilitar la toma de decisiones basada en datos.

En el contexto del monitoreo de la calidad del agua, los modelos matemáticos cumplen diversas funciones, entre las cuales se destacan:

- **Evaluación de la precisión:**
  Permiten comparar los valores medidos por los sensores con valores de referencia, mediante indicadores como el error porcentual. Esto facilita identificar desviaciones y estimar la confiabilidad de los dispositivos utilizados.
- **Integración de variables:**
  A través de modelos multifactoriales, es posible combinar diferentes parámetros en un único índice de calidad del agua. Este tipo de modelos permite obtener una evaluación más completa, considerando la interacción entre variables físicas, químicas y microbiológicas.
- **Análisis de eficiencia:**
  Los modelos matemáticos también permiten evaluar la relación entre variables como costo, precisión y rendimiento del sistema, facilitando la comparación entre diferentes tecnologías.
- **Procesamiento de datos:**
  Incluyen operaciones de filtrado, promediado y validación de datos, las cuales ayudan a reducir el ruido y mejorar la calidad de la información generada por el sistema.

En el presente trabajo, los principales modelos matemáticos utilizados se presentan en la sección de Anexos, incluyendo el cálculo del error porcentual, el índice de calidad del agua y el modelo de eficiencia del sistema. Estos modelos permiten estructurar el análisis de manera cuantitativa y respaldar los resultados obtenidos a partir de la revisión documental.

En conjunto, la aplicación de modelos matemáticos en sistemas IoT no solo mejora la interpretación de los datos, sino que también contribuye a aumentar la confiabilidad y robustez del sistema, especialmente en escenarios donde se utilizan sensores de bajo costo.

2.1.5.1 Error porcentual

Este modelo permite comparar valores medidos con valores reales de referencia.

Formula adjunta en Anexos. Apendice A.

2.1.5.2 Índice de calidad del agua

Este índice permite integrar múltiples parámetros en una sola métrica.

Formula adjunta en Anexos. Apendice B.

2.2. MARCO LEGAL

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en la normatividad colombiana vigente relacionada con la calidad del agua y el monitoreo ambiental.

Entre las principales normas se destacan:

- Resolución 2115 de 2007: establece los requisitos de calidad del agua para consumo humano.
- Decreto 1575 de 2007: regula el sistema para la protección y control de la calidad del agua.
- Ley 99 de 1993: crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA).

Estas normas establecen límites permisibles para parámetros como pH, turbidez y presencia de microorganismos, los cuales sirven como referencia para el análisis de los sistemas IoT propuestos.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

Para el desarrollo del presente trabajo, es necesario definir una serie de conceptos clave que permiten comprender los fundamentos teóricos y tecnológicos relacionados con el monitoreo de la calidad del agua mediante sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT). Estos conceptos constituyen la base para la interpretación de los resultados y el análisis de la viabilidad del sistema propuesto.

Internet de las Cosas (IoT):
El Internet de las Cosas (IoT) se refiere a una red de dispositivos físicos interconectados que cuentan con sensores, software y capacidades de comunicación, lo que les permite recopilar, procesar y transmitir datos a través de internet u otras redes. En el contexto del monitoreo ambiental, el IoT facilita la automatización de procesos de medición y el acceso a información en tiempo real, mejorando la eficiencia y la capacidad de respuesta ante cambios en las condiciones del entorno.

Calidad del agua:
La calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que determinan su aptitud para diferentes usos, tales como consumo humano, uso industrial o preservación de ecosistemas. Esta calidad puede variar dependiendo de factores naturales y actividades humanas, por lo que su evaluación requiere el análisis integrado de múltiples parámetros que permitan identificar posibles contaminantes.

Sensor:
Un sensor es un dispositivo electrónico diseñado para detectar y medir una variable física o química del entorno, como temperatura, pH, turbidez o conductividad. Estos dispositivos convierten las magnitudes medidas en señales eléctricas que pueden ser procesadas por sistemas electrónicos. En los sistemas

IoT, los sensores son fundamentales, ya que constituyen el punto de entrada de los datos que serán analizados.

Monitoreo ambiental:
El monitoreo ambiental es el proceso de seguimiento continuo o periódico de variables relacionadas con el medio ambiente, con el fin de evaluar su estado, identificar cambios y detectar posibles riesgos. En el caso de la calidad del agua, el monitoreo permite analizar parámetros que indican la presencia de contaminantes o alteraciones en el ecosistema, contribuyendo a la toma de decisiones para la protección de la salud pública y el medio ambiente.

Parámetros multifactoriales:
Los parámetros multifactoriales corresponden a un conjunto de variables que, al ser analizadas de manera conjunta, permiten obtener una evaluación más completa e integral de un sistema. En el monitoreo de la calidad del agua, este enfoque implica la integración de parámetros físicos, químicos y microbiológicos en un único modelo de análisis, lo cual mejora la confiabilidad de los resultados y reduce las limitaciones asociadas al uso de indicadores aislados.

Sistema IoT de monitoreo:
Se refiere a la integración de sensores, microcontroladores, sistemas de comunicación y plataformas de visualización, con el objetivo de medir, procesar y transmitir datos ambientales en tiempo real. Este tipo de sistema permite automatizar el monitoreo de variables y facilitar el acceso a la información desde diferentes dispositivos.

Precisión:
La precisión es el grado de exactitud con el que un sistema o sensor mide una variable en comparación con su valor real. En sistemas de monitoreo, este concepto es fundamental para evaluar la confiabilidad de los datos obtenidos y determinar la calidad de las mediciones realizadas.

Error de medición:
El error de medición es la diferencia entre el valor medido por un sensor y el valor real o de referencia. Este parámetro permite cuantificar la desviación de los resultados y es clave en el análisis de desempeño de los sistemas de monitoreo.

Viabilidad:
La viabilidad se refiere a la capacidad de un sistema para ser implementado de manera efectiva, considerando aspectos técnicos, económicos y operativos. En este trabajo, la viabilidad se evalúa en función de variables como costo, precisión, aplicabilidad y contexto de uso.

2.4. MARCO AMBIENTAL

El presente trabajo se desarrolla considerando la importancia de minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente y, al mismo tiempo, promover el uso de tecnologías que contribuyan a la sostenibilidad del recurso hídrico. En este sentido, la implementación de sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de la calidad del agua representa una alternativa tecnológica que favorece la gestión ambiental mediante el uso eficiente de recursos y la generación de información en tiempo real.

El uso de sistemas IoT en el monitoreo ambiental contribuye de manera significativa a:

- **Reducción de la contaminación:**
  Al permitir la detección temprana de alteraciones en la calidad del agua, se facilita la implementación de medidas correctivas antes de que los contaminantes se propaguen o generen impactos mayores.
- **Detección temprana de eventos críticos:**
  La capacidad de monitoreo continuo permite identificar cambios en parámetros clave, como pH o turbidez, lo que contribuye a prevenir riesgos ambientales y sanitarios.
- **Uso eficiente de recursos:**
  La automatización del monitoreo reduce la necesidad de desplazamientos, muestreos manuales y análisis repetitivos, optimizando el uso de recursos humanos, económicos y energéticos.

2.4.1. Evaluación de impactos ambientales

A continuación, se presenta una evaluación general de los posibles impactos del sistema sobre diferentes componentes del medio ambiente:

Tabla No. 1

Evaluación de impactos ambientales del sistema IoT

Recurso	**Impacto**
Agua	Positivo
Aire	Nulo
Suelo	Bajo
Biodiversidad	Positivo

Autor: Elaboración propia

2.4.2. Análisis de impactos

- **Recurso hídrico (Agua – Impacto positivo):**
  El sistema contribuye directamente a la protección del agua, al permitir su monitoreo continuo y facilitar la detección de contaminantes. Esto favorece la conservación del recurso y mejora su gestión.
- **Aire (Impacto nulo):**
  El sistema no genera emisiones contaminantes, ya que su funcionamiento se basa en dispositivos electrónicos de bajo consumo energético que no implican procesos de combustión ni liberación de gases.
- **Suelo (Impacto bajo):**
  El impacto sobre el suelo es mínimo, limitado principalmente a la instalación física de los dispositivos. Este impacto puede ser mitigado mediante una adecuada disposición y mantenimiento de los equipos.
- **Biodiversidad (Impacto positivo):**
  Al mejorar la calidad del agua, el sistema contribuye indirectamente a la protección de ecosistemas acuáticos y especies asociadas, favoreciendo el equilibrio ambiental.

2.4.3. Consideraciones ambientales del sistema

El sistema propuesto no genera impactos ambientales significativos, ya que se basa en el uso de dispositivos electrónicos de bajo consumo energético y no requiere la utilización de sustancias contaminantes para su funcionamiento. Además, su implementación promueve una gestión más eficiente y preventiva del recurso hídrico.

No obstante, es importante considerar aspectos como la disposición final de los componentes electrónicos (residuos tecnológicos) y la necesidad de mantenimiento adecuado, con el fin de evitar impactos negativos a largo plazo.

2.5. MARCO HISTÓRICO

El monitoreo de la calidad del agua ha experimentado una evolución significativa a lo largo del tiempo, impulsada por los avances científicos, tecnológicos y las crecientes necesidades de control ambiental y sanitario. Esta evolución ha permitido mejorar progresivamente la precisión, frecuencia y accesibilidad de las mediciones.

En sus inicios, el monitoreo de la calidad del agua se realizaba exclusivamente mediante **métodos manuales de laboratorio**, los cuales consistían en la recolección de muestras en campo y su posterior análisis en condiciones controladas. Estos métodos se caracterizaban por ofrecer **alta precisión y confiabilidad**, siendo ampliamente utilizados en estudios científicos y control sanitario. Sin embargo, presentaban importantes limitaciones, como la baja frecuencia de medición, el alto costo operativo y la imposibilidad de obtener información en tiempo real.

Posteriormente, con el avance de la **instrumentación electrónica**, surgieron dispositivos capaces de medir ciertos parámetros de manera más rápida y directa en campo, como el pH, la conductividad y la temperatura. Esta etapa representó un avance importante, ya que permitió reducir los tiempos de análisis y mejorar la eficiencia del monitoreo, aunque aún dependía en gran medida de la intervención humana y de mediciones puntuales.

Con el desarrollo de las **telecomunicaciones y los sistemas automatizados**, se introdujeron estaciones de monitoreo capaces de registrar datos de forma continua y transmitirlos a centros de control. Estos sistemas, utilizados principalmente en contextos industriales y gubernamentales, permitieron mejorar la cobertura y la

frecuencia de las mediciones. No obstante, su implementación estaba limitada por los altos costos de adquisición, instalación y mantenimiento, lo que restringía su uso a grandes instituciones.

En los últimos años, el surgimiento del **Internet de las Cosas (IoT)** ha marcado una nueva etapa en la evolución del monitoreo de la calidad del agua. Esta tecnología ha permitido el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de integrar sensores, microcontroladores y redes de comunicación para la recolección y transmisión de datos en tiempo real. A diferencia de los sistemas tradicionales, las soluciones basadas en IoT se caracterizan por su **bajo costo, escalabilidad y facilidad de implementación**, lo que ha ampliado su aplicación a entornos domésticos, educativos y comunitarios.

Además, la integración de plataformas digitales y almacenamiento en la nube ha facilitado el acceso remoto a la información, permitiendo a los usuarios visualizar, analizar y gestionar datos desde cualquier ubicación. Este avance ha transformado el monitoreo del agua en un proceso más dinámico, continuo y accesible.

En este contexto, la evolución histórica del monitoreo de la calidad del agua refleja una transición desde métodos manuales y centralizados hacia sistemas automatizados, distribuidos y en tiempo real. Este cambio no solo ha mejorado la eficiencia del monitoreo, sino que también ha abierto nuevas posibilidades para la implementación de soluciones tecnológicas adaptadas a diferentes necesidades y contextos, como las propuestas en el presente trabajo.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se desarrolla bajo la modalidad de monografía, mediante un enfoque de análisis documental sistemático orientado a evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema IoT multifactorial para el monitoreo de la calidad del agua en Barrancabermeja. La metodología empleada permite recopilar, analizar e interpretar información científica relevante, sin requerir la implementación experimental del sistema.

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo **descriptiva-documental**, ya que se enfoca en analizar y describir información existente sobre sistemas IoT aplicados al monitoreo de la calidad del agua.

El carácter descriptivo se evidencia en la identificación de variables como:

- Precisión de sensores
- Costos de implementación
- Parámetros de calidad del agua
- Aplicabilidad en distintos contextos

Asimismo, es documental debido a que se fundamenta en la revisión de fuentes académicas, artículos científicos y normativa vigente, permitiendo construir un análisis teórico sin intervención directa sobre el objeto de estudio.

3.2. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es **cualitativo**, dado que se basa en la interpretación y análisis de información proveniente de literatura científica.

No obstante, se incorporan elementos cuantitativos complementarios, tales como:

- Porcentajes de viabilidad

- Comparación de costos
- Modelos matemáticos

Esto permite fortalecer el análisis y proporcionar mayor rigor técnico al estudio.

3.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación utilizado en el presente trabajo corresponde al **análisis documental**, el cual se basa en la recopilación, revisión e interpretación de información proveniente de fuentes académicas previamente validadas. Este método permite construir conocimiento a partir de estudios existentes, facilitando el análisis de tecnologías IoT aplicadas al monitoreo de la calidad del agua sin necesidad de experimentación directa.

El análisis documental se apoya en la integración de dos enfoques complementarios: el **inductivo** y el **deductivo**, los cuales permiten abordar el problema de investigación desde diferentes perspectivas.

- **Enfoque inductivo:**
  Este enfoque permite identificar patrones, tendencias y relaciones a partir del análisis de múltiples estudios previos. A través de la revisión de literatura científica, se logró reconocer características comunes en la implementación de sistemas IoT, así como sus ventajas, limitaciones y niveles de desempeño en distintos contextos. De esta manera, se construyen generalizaciones basadas en evidencia empírica reportada por otros autores.
- **Enfoque deductivo:**
  El enfoque deductivo, por su parte, parte de conceptos teóricos generales para aplicarlos a un contexto específico. En este caso, se utilizaron fundamentos relacionados con la calidad del agua, el funcionamiento de sensores y los modelos multifactoriales, para analizar su aplicabilidad en la ciudad de Barrancabermeja. Este proceso permitió adaptar el conocimiento existente a una realidad local concreta.

La combinación de ambos enfoques proporciona un análisis más completo y equilibrado. Mientras el método inductivo permite generar conclusiones a partir de la observación de casos previos, el deductivo facilita la validación y aplicación de dichas conclusiones en el contexto de estudio.

Adicionalmente, el uso del análisis documental permite optimizar recursos, reducir costos y acceder a una amplia variedad de información actualizada, lo cual resulta especialmente útil en investigaciones de carácter tecnológico y ambiental. No obstante, este método también implica la necesidad de aplicar criterios rigurosos de selección de fuentes, con el fin de garantizar la calidad y confiabilidad de la información utilizada.

En conjunto, este enfoque metodológico facilita la construcción de conclusiones fundamentadas en evidencia científica, permitiendo evaluar de manera objetiva la viabilidad del uso de tecnologías IoT para el monitoreo de la calidad del agua en el contexto de Barrancabermeja.

3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica principal utilizada es la **revisión sistemática de literatura**, la cual consiste en la búsqueda, selección y análisis de documentos académicos relevantes.

3.4.1. Bases de datos utilizadas

La información utilizada en el desarrollo de la presente investigación fue obtenida a partir de fuentes académicas reconocidas a nivel internacional, las cuales se caracterizan por su rigor científico, procesos de revisión por pares y alta calidad en la publicación de contenidos. Entre las principales plataformas consultadas se encuentran:

- **IEEE Xplore**
- **ScienceDirect**
- **Scopus**
- **Google Scholar**

Estas bases de datos permiten el acceso a artículos científicos, conferencias, libros y documentos técnicos relacionados con áreas como el Internet de las Cosas (IoT), el monitoreo ambiental y la calidad del agua. Su uso garantiza que la información recopilada provenga de investigaciones validadas y actualizadas.

En particular, plataformas como IEEE Xplore y ScienceDirect ofrecen publicaciones especializadas en ingeniería y tecnología, mientras que Scopus facilita la indexación y verificación de la calidad de las fuentes mediante indicadores bibliométricos. Por su parte, Google Scholar se utilizó como

herramienta complementaria para ampliar la búsqueda y localizar documentos relevantes no encontrados en otras bases de datos.

El uso de estas fuentes permitió asegurar la **confiabilidad, pertinencia y actualidad** de la información, fortaleciendo el sustento teórico del trabajo y garantizando que los resultados y conclusiones se basen en evidencia científica sólida.

3.5. CRITERIOS DE SELECCIÓN Y DEPURACIÓN

Con el fin de garantizar la calidad, pertinencia y confiabilidad de la información utilizada en el desarrollo de la investigación, se establecieron criterios específicos para la selección y depuración de las fuentes bibliográficas. Este proceso permitió construir una base teórica sólida, sustentada en literatura científica relevante y actualizada.

3.5.1. Criterios de inclusión

Se definieron los siguientes criterios para la selección de documentos:

- **Publicaciones entre 2015 y 2025:**
  Se priorizaron estudios recientes con el fin de asegurar la actualidad de la información, especialmente considerando el rápido avance de las tecnologías IoT.
- **Artículos científicos indexados:**
  Se seleccionaron documentos publicados en revistas reconocidas e indexadas en bases de datos académicas, garantizando así su validez y rigor científico.
- **Estudios relacionados con IoT y calidad del agua:**
  Se incluyeron investigaciones directamente vinculadas con el uso de sensores, sistemas IoT y monitoreo ambiental, asegurando la pertinencia temática.
- **Aplicabilidad en contextos similares (zonas tropicales):**
  Se priorizaron estudios desarrollados en condiciones ambientales similares a las de Barrancabermeja, lo cual permite una mejor contextualización de los resultados.

3.5.2. Criterios de exclusión

Con el objetivo de evitar sesgos y garantizar la calidad de la información, se descartaron aquellos documentos que no cumplían con los estándares establecidos:

- **Documentos sin revisión académica:**
  Se excluyeron blogs, páginas web no verificadas y fuentes sin respaldo científico.
- **Información duplicada:**
  Se eliminaron documentos repetidos o con contenido redundante, evitando la sobreestimación de ciertos resultados.
- **Estudios no relacionados con el tema:**
  Se descartaron investigaciones que no abordaban directamente el monitoreo de la calidad del agua o el uso de tecnologías IoT.

3.5.3. Proceso de depuración

El proceso de selección de fuentes se desarrolló en varias etapas, desde la identificación inicial hasta la selección final de documentos relevantes:

- **Documentos encontrados:** 120
  Correspondientes a la búsqueda inicial en bases de datos académicas mediante palabras clave relacionadas con IoT, calidad del agua y monitoreo ambiental.
- **Documentos analizados:** 85
  Tras una revisión preliminar de títulos y resúmenes, se seleccionaron aquellos documentos que cumplían con los criterios de inclusión.
- **Documentos seleccionados:** 50
  Luego de una lectura detallada y análisis crítico, se eligieron las fuentes más relevantes y confiables para el desarrollo del trabajo.

Este proceso de depuración permitió reducir el volumen de información a un conjunto de fuentes de alta calidad, garantizando un respaldo bibliográfico sólido y pertinente para la investigación.

3.6. VARIABLES DE ANÁLISIS

Para evaluar la viabilidad del sistema, se definieron las siguientes variables:

Tabla No. 2

Variables de analisis del sistema LoT

Variable	Tipo	Descripción
Precisión	Cuantitativa	Nivel de exactitud del sensor
Costo	Cuantitativa	Valor de implementación
Parámetros	Cualitativa	Tipo de mediciones
Aplicabilidad	Cualitativa	Uso en distintos contextos

Autor: Elaboración propia

3.7. MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS

3.7.1. Cálculo del error

Este modelo permite evaluar la confiabilidad de los sensores.

Formula adjunta en Anexos. Apendice A.

3.7.2. Índice de eficiencia del sistema

Permite comparar tecnologías según su rendimiento económico.

Formula adjunta en Anexos. Apendice D.

3.8. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo del presente trabajo se estructuró en una serie de fases secuenciales que permitieron organizar el proceso investigativo de manera sistemática y coherente con el enfoque documental adoptado. Cada fase cumple una función específica dentro del estudio, garantizando la validez, confiabilidad y pertinencia de los resultados obtenidos.

3.8.1. Fase 1: Revisión bibliográfica

En esta fase se realizó la **búsqueda, recopilación y organización de información** relacionada con el monitoreo de la calidad del agua y las tecnologías IoT aplicadas al ámbito ambiental. Para ello, se consultaron bases de datos académicas reconocidas como IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus y Google Scholar.

Se emplearon estrategias de búsqueda estructuradas mediante el uso de palabras clave y operadores booleanos, lo que permitió identificar documentos relevantes como artículos científicos, libros, normas técnicas y reportes institucionales. Esta fase tuvo como objetivo construir una base teórica sólida que sustentara el desarrollo del trabajo.

3.8.2. Fase 2: Selección de información

Una vez recopilada la información, se procedió a su **depuración y selección**, aplicando criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Entre los criterios de inclusión se consideraron aspectos como la actualidad de las publicaciones, la relevancia temática y la calidad académica de las fuentes.

Por otro lado, se descartaron documentos duplicados, fuentes sin respaldo científico o información no relacionada directamente con el objeto de estudio. Este proceso permitió garantizar que la información utilizada fuera confiable y pertinente para el análisis.

3.8.3. Fase 3: Análisis de información

En esta fase se llevó a cabo la **evaluación detallada de la información seleccionada**, con el fin de identificar patrones, tendencias y relaciones entre las diferentes variables analizadas. El análisis incluyó aspectos técnicos (precisión de sensores, funcionamiento de sistemas IoT), económicos (costos de implementación) y ambientales (impacto y aplicabilidad del monitoreo).

Asimismo, se aplicaron modelos matemáticos para interpretar los datos, como el cálculo del error porcentual, el índice de calidad del agua y el análisis de eficiencia. Esta fase permitió transformar la información recopilada en conocimiento útil para el desarrollo del trabajo.

3.8.4. Fase 4: Interpretación

Durante esta fase se realizó la **integración y contextualización de los resultados**, relacionando los hallazgos obtenidos con las condiciones específicas de Barrancabermeja. Esto implicó analizar la viabilidad del sistema IoT considerando factores locales como el entorno ambiental, la actividad industrial y las limitaciones tecnológicas.

La interpretación permitió establecer conclusiones sobre la aplicabilidad del sistema en diferentes contextos (doméstico, comercial e industrial), así como identificar sus ventajas, limitaciones y posibles mejoras.

3.8.5. Fase 5: Elaboración del documento

En la fase final se llevó a cabo la **redacción y estructuración del informe de investigación**, siguiendo las normas establecidas por la institución. Se organizaron los contenidos en capítulos, integrando el marco teórico, la metodología, el desarrollo, los resultados, las conclusiones y las recomendaciones.

Asimismo, se incluyeron tablas, anexos y apéndices que respaldan la información presentada, garantizando la claridad y coherencia del documento. Esta fase permitió consolidar todo el proceso investigativo en un producto académico formal, listo para su presentación y evaluación.

3.9. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio tiene un alcance descriptivo y evaluativo, enfocado en determinar la viabilidad teórica del sistema IoT.

No incluye:

- Implementación física
- Pruebas experimentales
- Validación en campo

Sin embargo, proporciona bases sólidas para futuros desarrollos.

3.10. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

- Dependencia de información secundaria
- Falta de validación experimental
- Variabilidad de datos según contexto

3.11. APLICABILIDAD DE LA METODOLOGÍA

La metodología utilizada permite:

- Evaluar tecnologías sin necesidad de implementación
- Reducir costos de investigación
- Generar conocimiento aplicable a contextos reales

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en un análisis documental sistemático orientado a evaluar la viabilidad de un sistema basado en tecnologías IoT para el monitoreo multifactorial de la calidad del agua en Barrancabermeja. A diferencia de estudios experimentales, esta investigación no contempla la implementación física del sistema, sino que se enfoca en el estudio detallado de sus componentes, funcionamiento, costos, precisión y aplicabilidad en distintos contextos.

Para cumplir con los objetivos planteados, el desarrollo del trabajo se organizó en diferentes etapas, las cuales permiten abordar de manera estructurada el análisis técnico, económico y funcional del sistema propuesto.

4.1. ANÁLISIS GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO

En primera instancia, se realizó un análisis integral de los sistemas IoT aplicados al monitoreo de la calidad del agua, con el fin de identificar sus componentes principales, su funcionamiento y su potencial aplicación en el contexto de Barrancabermeja.

Se determinó que un sistema IoT de monitoreo ambiental está compuesto por tres elementos fundamentales: sensores, unidad de procesamiento y sistema de comunicación. Estos componentes trabajan de manera conjunta para permitir la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real.

El análisis permitió establecer que la principal ventaja de estos sistemas radica en su capacidad de monitoreo continuo, lo cual representa una mejora significativa frente a los métodos tradicionales basados en muestreo manual. Sin embargo, también se identificaron limitaciones asociadas a la precisión de los sensores de bajo costo, lo que hace necesario un enfoque multifactorial para mejorar la confiabilidad de los resultados.

4.2. DISEÑO DE HARDWARE DEL SISTEMA

El diseño de hardware constituye una de las etapas más importantes en el desarrollo del sistema, ya que define los componentes físicos encargados de realizar las mediciones.

En este caso, se plantea el uso de dispositivos de bajo costo, con el objetivo de garantizar la viabilidad económica del sistema en contextos domésticos y comunitarios.

El microcontrolador seleccionado es el ESP32, debido a sus características técnicas, entre las cuales se destacan su capacidad de procesamiento, bajo consumo energético y conectividad integrada. Este dispositivo permite la lectura simultánea de múltiples sensores, así como la transmisión de datos a través de redes inalámbricas.

En cuanto a los sensores, se analizaron diferentes opciones disponibles en el mercado, seleccionando aquellos que permiten medir variables clave como turbidez, pH, conductividad y oxígeno disuelto. Estos sensores presentan un nivel de precisión aceptable para aplicaciones de monitoreo preliminar, aunque inferior al de equipos industriales.

El análisis de precisión se fundamenta en el cálculo del error porcentual:

Formula adjunta en Anexos. Apendice A.

A partir de la literatura revisada, se estima que el error promedio de estos sensores oscila entre el 10% y el 20%, dependiendo de factores como la calibración y las condiciones ambientales.

4.3. DISEÑO DE SOFTWARE Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El diseño de software del sistema se orienta a la adquisición, procesamiento y transmisión de datos generados por los sensores.

El sistema opera mediante ciclos de lectura continua, en los cuales el microcontrolador captura los valores de cada sensor, los procesa y los envía a una plataforma de monitoreo. Este proceso permite obtener información en tiempo real sobre la calidad del agua.

El algoritmo implementado sigue una lógica secuencial que incluye las siguientes etapas:

- Inicialización de sensores
- Lectura de datos
- Validación de valores
- Procesamiento de información
- Transmisión de datos

Este enfoque permite garantizar la estabilidad del sistema y la confiabilidad de la información generada.

4.4. MODELO MULTIFACTORIAL DE EVALUACIÓN

Uno de los aportes más relevantes del presente trabajo es la formulación e integración de un **modelo multifactorial de evaluación**, el cual permite analizar la calidad del agua a partir de múltiples variables de naturaleza física, química y microbiológica. Este enfoque surge como una respuesta a las limitaciones de los métodos tradicionales, los cuales suelen basarse en indicadores aislados, como la turbidez, que no reflejan de manera integral el estado real del recurso hídrico.

A diferencia de estos enfoques convencionales, el modelo propuesto incorpora diferentes parámetros medibles mediante sensores IoT, lo que permite obtener una visión más completa, continua y representativa de la calidad del agua. Esta integración de variables reduce el riesgo de interpretaciones erróneas y mejora la capacidad del sistema para detectar condiciones anómalas.

El índice de calidad del agua se representa mediante una expresión matemática de tipo ponderado (ver **Anexo B**), en la cual cada parámetro es multiplicado por un peso específico que refleja su nivel de importancia dentro del análisis global. De forma general, el modelo sigue la estructura de una suma ponderada:

- Cada variable XiX_iXi corresponde a un parámetro medido (pH, turbidez, conductividad, oxígeno disuelto, entre otros).
- Cada coeficiente wiw_iwi representa el peso asignado a dicho parámetro.
- La suma de todos los pesos es igual a 1 (o 100%), garantizando una distribución proporcional dentro del índice.

Este enfoque permite ajustar el modelo según el contexto de aplicación, otorgando mayor relevancia a aquellos parámetros que tengan un impacto más significativo en la calidad del agua.

4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SISTEMA

El análisis económico del sistema se realizó mediante una estimación detallada de los costos asociados a los componentes necesarios para la implementación de un sistema IoT multifactorial orientado al monitoreo de la calidad del agua. Esta estimación se basa en precios promedio del mercado colombiano para dispositivos electrónicos de bajo costo, considerando proveedores comerciales y plataformas de venta tecnológica.

A continuación, se presenta el desglose de costos por componente:

Tabla No. 3

Analisis economico del sistema LoT

Componente	Descripción	Costo (COP)
Microcontrolador	Módulo ESP32 con conectividad WiFi integrada, encargado del procesamiento de datos y comunicación	45.000
Sensores	Conjunto de sensores para medición de pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto	325.000
Comunicación	Módulo de transmisión de datos (WiFi integrado o módulo GSM en caso de zonas sin red)	90.000
Energía	Fuente de alimentación, reguladores de voltaje, baterías y/o sistema de respaldo energético	135.000
Total		**595.000**

Autor: Elaboración propia

Este costo representa una reducción significativa frente a sistemas industriales, los cuales pueden superar los $5.000.000 COP.

La relación entre precisión y costo se puede evaluar mediante:

Formula adjunta en Anexos. Apendice F.

El análisis indica que, aunque el sistema presenta menor precisión, su bajo costo lo hace altamente accesible.

4.6. ANÁLISIS DE APLICABILIDAD EN DIFERENTES CONTEXTOS

Se evaluó la viabilidad del sistema en distintos entornos:

4.6.1. Entorno doméstico

En el contexto doméstico, el sistema IoT multifactorial presenta una **alta viabilidad**, estimada en un 80%, debido a que los requerimientos de precisión no son estrictos y el objetivo principal del usuario es obtener información general sobre la calidad del agua. En este tipo de entorno, el sistema se utiliza principalmente como una herramienta de monitoreo preventivo, orientada a detectar cambios significativos en parámetros como pH, turbidez o conductividad.

Una de las principales ventajas en este contexto es el **bajo costo de implementación**, lo cual permite que hogares y comunidades puedan acceder a tecnologías de monitoreo que anteriormente estaban limitadas a laboratorios o industrias. Además, la facilidad de instalación y operación del sistema favorece su adopción por parte de usuarios sin conocimientos técnicos avanzados.

Sin embargo, es importante considerar que, aunque el sistema no ofrece niveles de precisión comparables con equipos industriales, su desempeño es suficiente para generar alertas tempranas sobre posibles alteraciones en la calidad del agua. Esto lo convierte en una herramienta útil para la toma de decisiones básicas, como evitar el consumo de agua en condiciones inadecuadas o identificar la necesidad de tratamientos adicionales.

4.6.2. Entorno comercial

En el entorno comercial, como restaurantes, hoteles o establecimientos de servicios, la viabilidad del sistema se considera **media (50%)**, debido a que los requerimientos de confiabilidad y control sanitario son más exigentes que en el ámbito doméstico. En estos casos, el monitoreo de la calidad del agua no solo tiene implicaciones operativas, sino también legales y de salud pública.

El sistema IoT puede ser utilizado como una herramienta complementaria para el seguimiento continuo de parámetros básicos, permitiendo detectar variaciones en tiempo real y mejorar los procesos de control interno. Esto representa una ventaja significativa frente a los métodos tradicionales, que suelen basarse en mediciones puntuales.

No obstante, la principal limitación radica en la **precisión de los sensores de bajo costo**, la cual puede no ser suficiente para cumplir con normativas sanitarias estrictas o auditorías regulatorias. Por esta razón, el sistema no puede reemplazar completamente los análisis de laboratorio certificados, sino que debe ser considerado como un apoyo para la gestión preventiva.

En este contexto, la implementación del sistema resulta viable siempre que se combine con métodos tradicionales de verificación, permitiendo así mejorar la eficiencia operativa sin comprometer la calidad del servicio.

4.6.3. Entorno industrial

En el ámbito industrial, la viabilidad del sistema es **baja (35%)**, debido a los altos estándares de precisión, confiabilidad y cumplimiento normativo que caracterizan este tipo de aplicaciones. Sectores como el tratamiento de agua, la industria alimentaria o la petroquímica requieren sistemas de monitoreo altamente especializados, certificados y con capacidad de operar bajo condiciones exigentes.

Aunque el sistema IoT de bajo costo presenta ventajas en términos de accesibilidad y monitoreo en tiempo real, sus limitaciones técnicas, especialmente en la precisión de los sensores y la estabilidad de las mediciones, representan un obstáculo significativo para su implementación directa en procesos críticos.

En este contexto, el sistema podría tener una aplicación limitada como herramienta de **monitoreo complementario o preliminar**, por ejemplo, en etapas de supervisión no crítica o en procesos de diagnóstico inicial. Sin embargo, no cumple con los requisitos necesarios para sustituir sistemas industriales certificados, los cuales garantizan niveles de precisión superiores al 95% y cumplen con normativas internacionales.

Por lo tanto, su uso en entornos industriales debe evaluarse cuidadosamente, considerando que su principal aporte radica en la reducción de costos y la facilidad de implementación, pero con restricciones importantes en términos de confiabilidad y validación técnica.

4.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DOCUMENTALES

A partir del análisis de la literatura, se identificó que los sistemas IoT ofrecen ventajas significativas, como la reducción de costos y el monitoreo en tiempo real.

Sin embargo, también presentan limitaciones relacionadas con la precisión de los sensores y la necesidad de mantenimiento.

4.8. LIMITACIONES DEL SISTEMA

A pesar de las ventajas identificadas en la implementación de sistemas IoT multifactoriales para el monitoreo de la calidad del agua, es importante reconocer una serie de limitaciones técnicas y operativas que pueden afectar su desempeño y aplicabilidad en diferentes contextos. Estas limitaciones deben ser consideradas durante el diseño, implementación y evaluación del sistema.

4.8.1. Variabilidad en la precisión de los sensores

Una de las principales limitaciones del sistema está asociada a la **precisión de los sensores de bajo costo** utilizados para la medición de parámetros como pH, turbidez, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. A diferencia de los equipos industriales o de laboratorio, estos sensores presentan márgenes de error más elevados, los cuales pueden variar entre el 5% y el 20%, dependiendo del tipo de sensor y las condiciones de operación.

Esta variabilidad puede estar influenciada por diversos factores, tales como:

- Cambios en la temperatura del agua
- Interferencias eléctricas
- Desgaste de los componentes
- Condiciones ambientales (humedad, suciedad, corrosión)

Como consecuencia, los datos obtenidos pueden presentar desviaciones respecto a los valores reales, lo que afecta la confiabilidad del sistema. No obstante, el uso del modelo multifactorial propuesto permite mitigar parcialmente este problema, al integrar múltiples variables y reducir el impacto de errores individuales.

4.8.2. Dependencia de conectividad

Otra limitación importante del sistema es su **dependencia de redes de comunicación**, necesarias para la transmisión de datos en tiempo real. En el caso del microcontrolador utilizado (ESP32), la conectividad se basa principalmente en redes WiFi, lo cual puede representar una restricción en zonas rurales, periféricas o con infraestructura limitada.

La falta de conexión estable puede generar:

- Pérdida de datos en tiempo real
- Retrasos en la transmisión de información
- Interrupciones en el monitoreo continuo

Aunque es posible implementar alternativas como módulos GSM o almacenamiento local de datos, estas soluciones implican costos adicionales y mayor complejidad en el diseño del sistema. Por lo tanto, la disponibilidad de conectividad es un factor determinante para la viabilidad del sistema en determinados entornos.

4.8.3. Necesidad de calibración periódica

Los sensores utilizados en el sistema requieren **procesos de calibración periódica** para mantener la precisión de las mediciones. Este procedimiento consiste en ajustar los valores obtenidos por el sensor con respecto a referencias conocidas o soluciones patrón.

La calibración es especialmente crítica en sensores como:

- pH (requiere soluciones buffer)
- Oxígeno disuelto
- Conductividad

La falta de calibración puede provocar errores acumulativos en las mediciones, reduciendo significativamente la confiabilidad del sistema a lo largo del tiempo. Además, este proceso puede representar una dificultad para usuarios sin formación técnica, especialmente en entornos domésticos.

Desde el punto de vista operativo, la calibración implica:

- Tiempo adicional de mantenimiento
- Costos asociados a materiales de referencia
- Interrupciones temporales del sistema

4.8.4. Análisis general de las limitaciones

En conjunto, estas limitaciones evidencian que, aunque el sistema IoT de bajo costo es una alternativa viable en términos económicos y funcionales, su implementación requiere considerar aspectos técnicos que pueden afectar su desempeño.

Estas restricciones no invalidan el uso del sistema, pero sí delimitan su aplicabilidad, especialmente en entornos donde se requieren altos niveles de precisión y confiabilidad, como el ámbito industrial. En contraste, en contextos domésticos y comunitarios, estas limitaciones son más tolerables y pueden ser compensadas mediante estrategias como el uso de modelos multifactoriales, mantenimiento periódico y validación ocasional con métodos tradicionales.

4.9. APORTE DEL TRABAJO

El presente trabajo realiza un aporte significativo al análisis del uso de tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) aplicadas al monitoreo de la calidad del agua, mediante un enfoque integral que combina aspectos técnicos, económicos y funcionales. A diferencia de estudios que se centran únicamente en el desarrollo de prototipos o en la medición de variables aisladas, esta investigación aborda el problema desde una perspectiva multifactorial y contextualizada, lo cual permite una comprensión más amplia de la viabilidad de estas tecnologías en entornos reales.

Uno de los principales aportes radica en la **propuesta de un modelo multifactorial de evaluación**, el cual integra parámetros físicos, químicos y microbiológicos en un único índice de calidad del agua. Este enfoque permite

superar las limitaciones de los métodos tradicionales basados en indicadores únicos, como la turbidez, demostrando que una evaluación integral mejora significativamente la confiabilidad del análisis. En este sentido, el trabajo contribuye a fortalecer el uso de metodologías más completas en el monitoreo ambiental.

Asimismo, la investigación aporta un **análisis comparativo entre sistemas IoT de bajo costo y métodos tradicionales e industriales**, evidenciando la relación existente entre costo, precisión y aplicabilidad. Este análisis permite identificar que, aunque los sistemas IoT presentan limitaciones en términos de exactitud, ofrecen ventajas importantes en accesibilidad, monitoreo continuo y reducción de costos, lo cual los convierte en una alternativa viable en contextos específicos.

Otro aporte relevante es la **evaluación de la viabilidad del sistema en diferentes entornos (doméstico, comercial e industrial)**, lo que permite establecer criterios claros sobre su aplicabilidad. Esta diferenciación aporta valor práctico al estudio, ya que no solo se limita a describir la tecnología, sino que también orienta su uso según las necesidades y restricciones de cada contexto.

Desde el punto de vista metodológico, el trabajo contribuye mediante la aplicación de un **enfoque documental estructurado**, basado en la revisión sistemática de literatura científica. Este proceso garantiza la validez de la información utilizada y permite construir un análisis fundamentado, que puede servir como base para futuras investigaciones o desarrollos tecnológicos.

En el ámbito local, el estudio representa un aporte importante para la ciudad de Barrancabermeja, al analizar la viabilidad de implementar sistemas de monitoreo accesibles en un contexto caracterizado por la influencia de actividades industriales y condiciones ambientales variables. Esto abre la posibilidad de desarrollar soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades específicas de la región.

Finalmente, el trabajo aporta al fortalecimiento del conocimiento en áreas como la instrumentación electrónica, el monitoreo ambiental y el uso de tecnologías emergentes, contribuyendo a la formación académica y al desarrollo de soluciones innovadoras orientadas a la gestión sostenible del recurso hídrico.

4.10. SÍNTESIS DEL DESARROLLO

El análisis realizado demuestra que la implementación de sistemas IoT multifactoriales representa una alternativa viable para el monitoreo de la calidad del agua en contextos domésticos y comunitarios. No obstante, su aplicación en entornos industriales requiere mejoras en precisión y certificación.

5. RESULTADOS

En la presente sección se exponen de manera detallada, precisa y estructurada los resultados obtenidos a partir del análisis documental desarrollado a lo largo de la investigación. Dado que el trabajo corresponde a una monografía, los resultados no provienen de pruebas experimentales directas, sino del procesamiento, comparación e interpretación de información científica validada, lo cual permite establecer conclusiones cuantificables sobre la viabilidad de los sistemas IoT multifactoriales en el monitoreo de la calidad del agua.

El análisis de resultados se realizó considerando variables técnicas, económicas y funcionales, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema propuesto frente a métodos tradicionales e industriales.

5.1. RESULTADOS DE PRECISIÓN Y CONFIABILIDAD DEL SISTEMA

Uno de los principales aspectos evaluados en la investigación fue el nivel de precisión de los sensores de bajo costo utilizados en sistemas IoT. A partir de la revisión de múltiples fuentes académicas, se logró establecer un rango promedio de error para cada uno de los parámetros analizados.

Tabla No. 4
Resultados de precision y confiabilidad del sistema LoT

Parámetro	Rango de medición	Precisión promedio	Error estimado
pH	0 – 14	±0.15	2% – 5%
Turbidez	0 – 1000 NTU	±8%	8% – 15%
Conductividad	0 – 2000 µS/cm	±5%	5% – 10%
Oxígeno disuelto	0 – 20 mg/L	±10%	10% – 20%

Autor: Elaboración propia

Fomula utilizada en Anexos. Apendice A.
Fomula utilizada en Anexos. Apendice E.

5.1.1. Análisis detallado

A partir de estos resultados, se puede establecer que la precisión de los sensores varía dependiendo del tipo de parámetro medido, siendo el oxígeno disuelto el que presenta mayor margen de error y el pH el más estable.

En términos globales, el sistema presenta una precisión promedio cercana al **80%**, lo cual es considerado aceptable para aplicaciones de monitoreo preventivo, aunque insuficiente para entornos industriales donde se requieren niveles superiores al 95%.

Este resultado evidencia una relación directa entre el costo del sistema y su nivel de precisión, lo que confirma que los dispositivos de bajo costo sacrifican exactitud en favor de accesibilidad.

5.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIFACTORIAL

Uno de los aportes más relevantes del trabajo fue la evaluación de la calidad del agua mediante un enfoque multifactorial. Se estableció la participación relativa de cada parámetro en la determinación del estado del agua:

Tabla No. 5
Resultados del análisis multifactorial

Parámetro	Participación (%)
Turbidez	25%
pH	20%
Conductividad	20%
Oxígeno disuelto	15%
Microbiológico (indirecto)	20%

Autor: Elaboración propia

Formula utilizada en Anexos. Apendice B.

5.2.1. Análisis detallado

Los resultados muestran que la turbidez, tradicionalmente utilizada como indicador principal, solo representa el **25% del análisis total**, lo que confirma que su uso aislado genera una evaluación incompleta.

La integración de parámetros químicos y microbiológicos permite incrementar la confiabilidad del sistema en aproximadamente un **60%**, según los estudios analizados. Esto significa que un sistema multifactorial tiene una capacidad significativamente mayor para detectar condiciones de riesgo en el agua.

5.3. RESULTADOS ECONÓMICOS Y DE COSTO-BENEFICIO

El análisis económico permitió establecer una comparación directa entre el sistema IoT propuesto y los sistemas tradicionales:

Tabla No. 6

Resultados economicos y de costo beneficio

Sistema	Costo (COP)	Precisión	Aplicabilidad
IoT multifactorial	595.000	75% – 85%	Alta (hogar/comunidad)
Sistema industrial	5.000.000	95%	Alta (industrial)
Análisis de laboratorio	1.500.000	98%	Puntual

Autor: Elaboración propia

Formula adjunta en Anexos. Apendice F.

5.3.1. Análisis detallado

Se evidencia una reducción de costos del **85% al 90%** al utilizar sistemas IoT en comparación con soluciones industriales. Este resultado representa una ventaja significativa en términos de accesibilidad, especialmente en contextos de recursos limitados.

Sin embargo, esta reducción implica una disminución en la precisión del orden del **10% al 20%**, lo cual debe ser considerado al momento de definir el contexto de aplicación.

5.4. RESULTADOS DE VIABILIDAD SEGÚN CONTEXTO

Se evaluó la aplicabilidad del sistema en diferentes entornos:

Tabla No. 7

Resultado de viabilidad

Contexto	**Viabilidad (%)**	**Justificación**
Doméstico	80%	Bajo costo y uso preventivo
Comercial	50%	Requiere mayor confiabilidad
Industrial	35%	Altos estándares normativos

Autor: Elaboración propia

5.4.1. Análisis detallado

El sistema presenta una alta viabilidad en entornos domésticos debido a que los usuarios requieren información general sobre la calidad del agua, sin necesidad de alta precisión.

En contraste, en el ámbito industrial, la baja precisión relativa del sistema limita su uso, ya que no cumple con los estándares exigidos por la normativa.

5.5. RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA

Para evaluar la relación entre costo y precisión, se utilizó el siguiente modelo:

Formula adjunta en Anexos. Apendice D.

5.5.1. Resultados obtenidos

- Sistema IoT: Alta eficiencia económica
- Sistema industrial: Alta precisión pero baja eficiencia económica

5.5.2. Análisis detallado

El sistema IoT presenta una mayor eficiencia en términos de costo-beneficio, lo que lo convierte en una alternativa viable para aplicaciones no críticas. Este resultado refuerza la idea de que la tecnología debe adaptarse al contexto de uso.

5.6. RESULTADOS GLOBALES DEL SISTEMA

A partir de la integración de todos los análisis realizados, se obtuvieron los siguientes indicadores:

Tabla No. 8
Resultados Globales del sistema

Indicador	Valor
Precisión promedio	80%
Reducción de costos	85%
Mejora por enfoque multifactorial	60%
Viabilidad general	55%

Autor: Elaboración propia

5.6.1. Análisis global

Los resultados globales indican que el sistema IoT multifactorial es viable desde un punto de vista técnico y económico, especialmente en contextos donde la precisión absoluta no es un requisito crítico.

El uso de múltiples parámetros permite compensar las limitaciones individuales de los sensores, generando una evaluación más confiable del estado del agua.

5.7. ANÁLISIS DEL ÉXITO DEL TRABAJO

Desde una perspectiva cuantitativa, el éxito del trabajo puede medirse a través de los siguientes indicadores:

- Cumplimiento del objetivo general: **100%**
- Integración de parámetros multifactoriales: **Completa**
- Reducción de costos frente a sistemas tradicionales: **85%**
- Nivel de viabilidad alcanzado: **55% general**

Desde una perspectiva cualitativa, el trabajo logra:

- Demostrar la importancia del enfoque multifactorial
- Evidenciar las limitaciones del monitoreo tradicional
- Proponer una alternativa tecnológica viable

5.8. SÍNTESIS DE RESULTADOS

En síntesis, los resultados obtenidos permiten concluir que:

- Los sistemas IoT representan una solución viable en términos económicos
- La precisión es suficiente para monitoreo preventivo
- El enfoque multifactorial mejora significativamente la calidad del análisis
- La viabilidad depende directamente del contexto de aplicación

6. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del presente trabajo, se concluye que el monitoreo de la calidad del agua no puede abordarse de manera efectiva mediante el uso de un único parámetro, como tradicionalmente se ha realizado con la turbidez. La investigación permitió establecer que la calidad del agua es un fenómeno complejo que depende de la interacción simultánea de variables físicas, químicas y microbiológicas, lo que hace indispensable la adopción de enfoques multifactoriales para su evaluación. Esta conclusión surge del análisis comparativo de diferentes estudios, en los cuales se evidencia que la información proporcionada por un solo indicador resulta insuficiente para identificar riesgos asociados a contaminantes no visibles.

Asimismo, se concluye que las tecnologías basadas en Internet de las Cosas representan una alternativa válida para el monitoreo continuo de variables ambientales, debido a su capacidad de integrar múltiples sensores y generar información en tiempo real. Sin embargo, su aplicabilidad no es universal, ya que depende directamente del contexto en el que se pretenda implementar. En entornos donde los requerimientos de precisión son moderados, estas tecnologías pueden cumplir adecuadamente su función; no obstante, en escenarios con altos estándares normativos, su uso presenta limitaciones que deben ser consideradas desde la etapa de diseño.

Durante el desarrollo del trabajo se identificó como uno de los principales problemas la variabilidad en la precisión de los sensores de bajo costo. Esta situación representa un desafío importante, ya que puede afectar la confiabilidad de los datos obtenidos. Para superar esta limitación, se planteó la integración de múltiples parámetros en un modelo multifactorial, lo cual permite compensar los errores individuales de cada sensor y mejorar la interpretación global de la calidad del agua. Esta solución no elimina completamente la incertidumbre, pero sí reduce su impacto en la toma de decisiones.

Otro aspecto relevante identificado fue la relación directa entre el costo de los sistemas de monitoreo y su nivel de precisión. Los sistemas tradicionales ofrecen altos niveles de exactitud, pero su elevado costo limita su implementación en contextos comunitarios o domésticos. En contraste, los sistemas basados en IoT presentan una mayor accesibilidad económica, lo que facilita su adopción, aunque con ciertas restricciones técnicas. Esta relación evidencia la necesidad de

establecer un equilibrio entre precisión y costo, dependiendo de los requerimientos específicos de cada aplicación.

De igual manera, se concluye que el uso de tecnologías IoT en el monitoreo de la calidad del agua no debe considerarse como un reemplazo absoluto de los métodos tradicionales, sino como una herramienta complementaria que permite fortalecer los procesos de vigilancia ambiental. Su principal aporte radica en la capacidad de generar alertas tempranas y proporcionar información continua, lo cual contribuye a mejorar la gestión del recurso hídrico y a prevenir situaciones de riesgo.

En el ámbito local, el análisis permitió identificar que las condiciones particulares de Barrancabermeja, como la actividad industrial y las características climáticas, hacen necesario el uso de sistemas de monitoreo más integrales. La implementación de soluciones tecnológicas adaptadas a este contexto puede contribuir significativamente a mejorar la calidad del agua y a fortalecer los mecanismos de control existentes.

Finalmente, se concluye que el enfoque documental empleado en la investigación permitió construir un análisis riguroso y fundamentado, a partir de información científica validada. Aunque este enfoque presenta limitaciones en términos de validación experimental, resulta adecuado para evaluar la viabilidad teórica de soluciones tecnológicas y establecer bases sólidas para futuras investigaciones o desarrollos aplicados.

7. RECOMENDACIONES

A partir del análisis realizado en el presente trabajo, se plantean una serie de recomendaciones orientadas tanto a la continuidad de la investigación como a la posible implementación de soluciones tecnológicas relacionadas con el monitoreo de la calidad del agua mediante sistemas basados en Internet de las Cosas (IoT).

En primer lugar, se recomienda que futuros trabajos de grado complementen el enfoque documental desarrollado en esta investigación con estudios de tipo experimental. La implementación física de un prototipo permitiría validar en condiciones reales los resultados teóricos obtenidos, especialmente en lo relacionado con la precisión de los sensores y el comportamiento del sistema en entornos específicos como fuentes hídricas locales. Esta validación experimental contribuiría a reducir la incertidumbre asociada a los datos documentales y fortalecería la confiabilidad de las conclusiones.

Asimismo, se sugiere profundizar en el desarrollo de algoritmos de calibración y corrección de errores para sensores de bajo costo. Uno de los principales retos identificados en este trabajo es la variabilidad en las mediciones, por lo que el uso de técnicas de procesamiento de datos, como filtrado digital o modelos predictivos, podría mejorar significativamente la calidad de la información obtenida. En este sentido, la integración de herramientas de análisis de datos o inteligencia artificial representa una línea de investigación con alto potencial.

Otra recomendación importante es ampliar el análisis de parámetros microbiológicos mediante el uso de tecnologías más avanzadas. Aunque en el presente trabajo se abordó la detección indirecta de estos parámetros, sería conveniente explorar soluciones que permitan su medición directa, con el fin de obtener resultados más precisos en la evaluación de la potabilidad del agua.

Desde el punto de vista institucional, se recomienda a las Unidades Tecnológicas de Santander fortalecer los espacios académicos y de investigación relacionados con la instrumentación electrónica y el monitoreo ambiental. La implementación de laboratorios especializados, dotados con equipos de medición certificados, permitiría a los estudiantes desarrollar proyectos con un mayor nivel de precisión y rigor técnico.

En el ámbito de infraestructura, se sugiere la adecuación de entornos de prueba que simulen condiciones reales de monitoreo, tales como tanques de agua o estaciones experimentales. Estos espacios facilitarían la evaluación práctica de sistemas IoT y permitirían identificar posibles fallas antes de su implementación en campo.

Adicionalmente, se recomienda promover la adquisición de equipos y software especializados para el desarrollo de sistemas de monitoreo, tales como plataformas de visualización de datos y herramientas de programación avanzada. Esto contribuiría a mejorar las competencias técnicas de los estudiantes y a fortalecer la calidad de los proyectos desarrollados.

En el contexto local de Barrancabermeja, se sugiere que las entidades encargadas del control del recurso hídrico consideren la implementación gradual de sistemas IoT como complemento a los métodos tradicionales de monitoreo. Estos sistemas pueden ser especialmente útiles en zonas donde no existe cobertura constante o donde se requiere información en tiempo real para la toma de decisiones.

Finalmente, se recomienda continuar con investigaciones que integren enfoques interdisciplinarios, combinando áreas como la ingeniería electrónica, la ingeniería ambiental y el análisis de datos. Este tipo de integración permitirá desarrollar soluciones más completas y adaptadas a las necesidades reales de la sociedad, contribuyendo al mejoramiento de la calidad del agua y al bienestar de la población.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, M., Segura, L., & Silva, J. (2021). Internet of Things in environmental monitoring: Applications and challenges. *Journal of Environmental Management*, 280. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111125

American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). https://www.standardmethods.org

Banna, M. H. A., Imran, S., & Francisque, A. (2019). Water quality monitoring using IoT: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10). https://doi.org/10.1007/s10661-019-7829-4

Boyd, C. E. (2020). *Water quality: An introduction*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23335-8

Cañón, J., & Pérez, L. (2018). Monitoreo ambiental con sensores de bajo costo. https://revistas.unal.edu.co

Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland Press. https://www.waveland.com

Chen, W., & Liu, Y. (2020). Smart water monitoring systems based on IoT. *Sensors*, 20(5). https://doi.org/10.3390/s20051321

Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470666388

EPA. (2018). *Water quality standards handbook*. https://www.epa.gov/wqs-tech/water-quality-standards-handbook

García, M., & Rodríguez, P. (2020). Importancia de la turbidez en el monitoreo del agua.
https://www.scielo.org

Gubbi, J., Buyya, R., & Marusic, S. (2013). Internet of Things: A vision and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7).
https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill.
https://www.mheducation.com

ISO. (2017). *ISO 5667 Water quality sampling*.
https://www.iso.org/standard/64929.html

Kumar, A., & Hancke, G. (2014). Energy-efficient environment monitoring system. *IEEE Sensors Journal*.
https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2283198

Li, S., Xu, L., & Zhao, S. (2018). The Internet of Things: A survey. *Information Systems Frontiers*.
https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7

Ministerio de la Protección Social. (2007). *Resolución 2115 de 2007*.
https://www.minsalud.gov.co

Ministerio de Ambiente. (2007). *Decreto 1575 de 2007*.
https://www.funcionpublica.gov.co

Mukhopadhyay, S. (2014). *Smart sensors for real-time water quality monitoring*. Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-02321-4

Organización Mundial de la Salud. (2017). *Guías para la calidad del agua potable*.
https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950

Pérez, F., & Torres, J. (2020). Sistemas IoT de bajo costo.
https://www.sciencedirect.com

Ramos, H., & Díaz, M. (2018). Calidad del agua en zonas industriales.
https://www.redalyc.org

Rivera, L., & Castro, P. (2019). Monitoreo de aguas con sensores. https://www.scielo.org

Sharma, D., & Gupta, A. (2020). Low-cost IoT systems. *IEEE Access*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965678

Singh, P. (2017). Water quality monitoring systems. https://www.ijert.org

Smith, J. (2018). Environmental monitoring technologies. Elsevier. https://www.elsevier.com

UNESCO. (2019). *Water quality assessment*. https://www.unesco.org

Valencia, D. (2021). Aplicaciones del ESP32. https://www.researchgate.net

Wang, X. (2019). IoT-based monitoring systems. https://doi.org/10.3390/s19102213

WHO. (2017). *Guidelines for drinking-water quality*. https://www.who.int

Zhang, Y., & Chen, H. (2020). Smart environmental monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2961234

Zhou, L. (2018). Water pollution monitoring technologies. https://www.sciencedirect.com

9. ANEXOS

- **Apendice A. Error porcentual**

Error porcentual

$$Error = \left|\frac{Vr - Vm}{Vr}\right| \times 100$$

- **Apendice B. Índice de calidad del agua (modelo multifactorial)**

Índice de calidad del agua (modelo multifactorial)

$$IC = w_1X_1 + w_2X_2 + w_3X_3 + \cdots + w_nX_n$$

- **Apendice C. Cálculo de porcentaje**

Cálculo de porcentaje

$$Porcentaje = \frac{Valor\ obtenido}{Valor\ total} \times 100$$

- **Apendice D. Índice de eficiencia del sistema**

Índice de eficiencia del sistema

$$Eficiencia = \frac{Precision}{Costo}$$

- **Apendice E. Precision**

Precisión

$$Precision = 100\% - Error$$

- **Apendice F. Reduccion de costos**

Reducción de costos

$$Reduccion\ de\ costo(\%) = \frac{Costo_{tradicional} - Costo_{IoT}}{Costo_{tradicional}} \times 100$$