



Escuela de Ciencias e
Ingeniería



Universidad del
Rosario



Facultad de Estudios
Internacionales,
Políticos y Urbanos

**Diseño y simulación de un sistema IoT para la detección temprana de incendios forestales en
los cerros de Santiago de Cali**

Autor:

Valentina Loaiza Mejia

Universidad del Rosario

Maestría en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Escuela de Ciencias e Ingeniería

Facultad de Estudios Internacionales, Políticos y Urbanos

Bogotá Colombia, 1 de diciembre de 2025



Escuela de Ciencias e
Ingeniería



Universidad del
Rosario



Facultad de Estudios
Internacionales,
Políticos y Urbanos

**Diseño y simulación de un sistema IoT para la detección temprana de incendios forestales en
los cerros de Santiago de Cali**

Trabajo presentado para obtener el título de:
Magíster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Autor:

Valentina Loaiza Mejia

Director:

Jefferson Sarmiento Rojas Lic, Ing, Eng, PhD(c).

Universidad del Rosario

Maestría en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Escuela de Ciencias e Ingeniería

Facultad de Estudios Internacionales, Políticos y Urbanos

Bogotá Colombia, 1 de diciembre de 2025

CONTENIDO

CONTENIDO.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	11
2.1 Problemática.....	11
2.2 Justificación.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	17
4.1 Marco teórico.....	17
4.1.1 Sensores IoT.....	17
4.1.2 Cloud Computing	18
4.1.3 Monitoreo remoto de variables ambientales	18
4.1.4 Incendios Forestales	19
4.1.5 Cambio climático	20
4.1.6 Alerta temprana	21
4.1.7 Educación Ambiental	21
4.1.8 Participación ciudadana.....	22
4.2 Estado del arte	23
4.2.1 Metodología de la Revisión Sistemática de Literatura.....	23
4.2.2 Recursos de información y estrategias de búsqueda	23
4.2.3 Criterios de inclusión y exclusión	24
4.2.4 Recuperación de datos.....	25
4.2.5 Análisis de resultados.....	26

4.2.6	Síntesis comparativa del estado del arte y vacíos identificados.....	30
5.	METODOLOGÍA.....	31
6.	RESULTADOS ESPERADOS	35
6.1	Dimensión técnica	36
6.2	Dimensión ambiental.....	36
6.3	Dimensión institucional.....	37
6.4	Dimensión comunitaria	37
7.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	38
7.1	Descripción general del sistema propuesto	39
7.2	Arquitectura técnica del sistema.....	41
7.2.1	Justificación técnica de los componentes seleccionados.....	54
7.3	Enfoque Participativo: Gobernanza Comunitaria y Gestión Colaborativa del Riesgo.....	57
7.4	Viabilidad y Escalabilidad del Sistema Propuesto	61
7.5	Posibilidad de Implementación en Otros Contextos: Caso Bogotá.....	65
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
8.1	Resultados	67
8.1.1	Prototipo técnico y arquitectura funcional	67
8.2	Análisis y discusión.....	68
8.2.1	Coherencia entre la problemática y la solución tecnológica	68
8.2.2	Comparación con tendencias reportadas en la literatura	68
8.2.3	Evaluación del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)	69
8.2.4	Pertinencia sociotécnica y gobernanza del riesgo	71
8.2.5	Alcance logrado y contribuciones	72
8.2.6	Propuesta metodológica para la implementación futura	73
9.	PRESUPUESTO.....	75
10.	RIESGOS	77
11.	ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Protocolos de búsqueda.....	24
Tabla 2 Criterios de inclusión y exclusión	25
Tabla 3 Resumen de resultados	26
Tabla 4 Matriz de Responsabilidades para la Gestión del Sistema IoT	60
Tabla 5 Matriz de evaluación de viabilidad técnica.....	63
Tabla 6 Presupuesto	76
Tabla 7 Riesgos y estrategias de mitigación	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Zonas vulnerables a incendios forestales en Santiago de Cali.....	13
Ilustración 2 Diagrama Gantt	35
Ilustración 3 Arquitectura del sistema simulado	42
Ilustración 4 Simulación en Wokwi	43
Ilustración 5 Flujo de Node-RED.....	44
Ilustración 6 Base de datos.....	46
Ilustración 7 Pestañas: Login e Inicio	47
Ilustración 8 Pestañas: Reportar incendio, cursos y comunidad	48
Ilustración 9 Pestaña: Datos históricos y en tiempo real.....	49
Ilustración 10 Pestañas: Alertas y reportes	50
Ilustración 11 Estructura del sistema de predicción de incendios.....	52
Ilustración 12 Flujo de funcionamiento del modelo predictivo	53

RESUMEN

Este trabajo de grado presenta el diseño y validación por simulación de un sistema IoT de bajo costo para la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali, una zona altamente vulnerable debido al cambio climático, la expansión urbana y la limitada capacidad de vigilancia continua. El objetivo central es proponer y evaluar, en un entorno virtual, una arquitectura técnica capaz de monitorear variables ambientales críticas y emitir alertas oportunas, integrando sensores virtuales, procesamiento distribuido y analítica predictiva. Metodológicamente, se empleó un enfoque mixto basado en la revisión sistemática de literatura, el diseño conceptual del sistema, la simulación funcional mediante Wokwi, Node-RED y Firebase, y la incorporación de un modelo de riesgo entrenado con datos históricos del sistema FIRMS y condiciones meteorológicas locales. Los resultados incluyen la construcción de un prototipo virtual que demuestra la viabilidad técnica del sistema, la interoperabilidad entre sus componentes y su potencial para anticipar condiciones propicias para incendios, complementando la detección en tiempo real con capacidades predictivas. El análisis de madurez tecnológica ubica el desarrollo en un TRL 3, correspondiente a validación analítica en entorno de simulación, con posibilidades claras de avanzar hacia implementaciones físicas escalables en campo. En conjunto, la propuesta evidencia que la integración de IoT y analítica de datos puede fortalecer la vigilancia ambiental, reducir tiempos de respuesta y promover procesos de gobernanza comunitaria orientados a la prevención del riesgo.

Palabras clave: Detección de incendios forestales, IoT, sistemas de alerta temprana, monitoreo ambiental, participación ciudadana, datos FIRMS, resiliencia urbana, TRL.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la frecuencia e intensidad de los incendios forestales en la última década, acentuado por el cambio climático, ha generado una necesidad crítica de sistemas de alerta temprana más eficientes [1][2]. Diversas regiones (Mediterráneo, Estados Unidos, Canadá, entre otras) han sufrido pérdidas ambientales y económicas muy graves en cada temporada alta de incendios. En este contexto, la detección precoz es clave: «cuanto antes se identifique un incendio forestal, más rápido se puede controlar y minimizar los daños» [2]. A nivel global se han desarrollado tecnologías avanzadas para este fin, combinando observaciones remotas, redes de sensores in situ y técnicas de inteligencia artificial, con el fin de captar los inicios de un fuego antes de su propagación masiva. Sin embargo, cada estrategia tiene fortalezas y limitaciones inherentes, lo que motiva la integración de métodos complementarios y la adaptación de soluciones de bajo costo para entornos rurales o periurbanos de Latinoamérica [3].

Monitoreo satelital global

Las plataformas satelitales constituyen la primera línea de observación global. Por ejemplo, la NASA opera el *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS), que integra datos casi en tiempo real de los sensores MODIS y VIIRS para generar mapas de incendios activos en todo el planeta [3]. FIRMS ofrece visualización de focos térmicos actuales e históricos y herramientas para descargar datos SIG o configurar alertas automatizadas. Asimismo, sistemas similares (Copernicus EFFIS en Europa, Global Forest Watch Fires, entre otros) usan imágenes satelitales diarias o geostacionarias para detectar puntos calientes en bosque. No obstante, estas tecnologías remotas presentan limitaciones: los satélites geoestacionarios ofrecen cobertura continua, pero con muy baja resolución (~1 km) y los de órbita baja tienen mejor detalle (<100 m) pero tiempos de revisita largos [4]. Además, factores como la nubosidad, el humo o la topografía compleja pueden ocultar incendios incipientes y generar retrasos («fuegos perdidos») [3][4]. En la práctica, los datos satelitales suelen combinarse con información local para evitar omisiones, y se emplean algoritmos de detección de anomalías térmicas para mejorar la precisión y velocidad de alerta.

Sensores terrestres y redes IoT

Para la vigilancia en el terreno se despliegan redes de sensores ambientales interconectados (Internet de las Cosas). Estos nodos miden variables críticas –temperatura, humedad relativa, concentración de gases (CO, CO₂, etc.), nivel de humo, velocidad del viento, etc.– y comunican sus lecturas a un centro de datos o a la nube. Por ejemplo, proyectos documentados han usado placas de bajo costo (Raspberry Pi Zero o similares) junto con módulos de radio (XBee o LoRa) para montar *WSN* portátiles de bajo consumo [5]. Los sensores forman cercos electrónicos que permiten detectar cambios anómalos del ambiente; al detectar un aumento súbito de temperatura o humo un nodo alerta a través de la red al centro de control. Sistemas modernos, como el producto *Silvanet* de Dryad Networks, emplean sensores de gas alimentados por energía solar en una red IoT inalámbrica para «detectar incendios en fase de brasas y enviar alertas en tiempo real antes de que las llamas se propaguen» [6]. Estas redes de largo alcance (p.ej. LoRaWAN) pueden cubrir áreas remotas; su bajo consumo permite operar con baterías por años. Sin embargo, la escala práctica de cobertura es limitada: desplegar miles de nodos en vastas hectáreas resulta costoso y complejo [7]. En zonas donde no hay fácil acceso a internet, a menudo se combina la malla IoT con comunicación celular (tarjetas M2M) para asegurar la transmisión de datos ambientales a la nube. La información de estos sensores se integra en plataformas online que facilitan la gestión remota: por ejemplo, paneles GIS basados en la nube permiten visualizar en tiempo real las lecturas, generar alertas automáticas y ayudar a coordinar la respuesta de emergencia [3].

Drones y sensores aéreos

Además de la vigilancia fija, los Vehículos Aéreos No Tripulados (drones) juegan un rol creciente en la detección de incendios. Equipados con cámaras térmicas u ópticas de alta resolución y software de inteligencia artificial, estos drones sobre voladores pueden cubrir rutas predefinidas de hasta 100 km y permanecer en vuelo alrededor de 60 minutos. Durante su recorrido, capturan video e imágenes que el sistema analiza automáticamente para identificar humo o fuego en formación. Cuando un posible foco es detectado, los drones transmiten la ubicación exacta al centro de emergencia mediante aplicaciones web especializadas. Esta tecnología ha demostrado ser muy eficaz: un estudio indicó que los drones logran mayor precisión de localización y cobertura de áreas extensas a bajo costo comparado con satélites o sensores estáticos [8]. En Alemania, prototipos recientes detectan incendios incluso de madrugada mediante visión avanzada, reduciendo los

tiempos de respuesta crítica. No obstante, el uso de drones tiene limitaciones prácticas: requieren infraestructura logística (plataformas de lanzamiento/patrulla, recarga de baterías o combustible), y su desempeño puede verse afectado por condiciones meteorológicas adversas (viento, humo espeso). En general, se emplean drones como complemento de los sensores fijos y satelitales para confirmar visualmente focos detectados y para monitoreo dinámico en áreas de difícil acceso.

Inteligencia artificial y plataformas de monitoreo

La inteligencia artificial (IA) se integra para procesar en tiempo real los flujos de datos generados por satélites, sensores y drones. Algoritmos de *machine learning* analizan imágenes en busca de signos de fuego o humo y correlacionan variables ambientales para predecir riesgos. Un caso emblemático es el sistema ALERTCalifornia, que conecta más de mil cámaras distribuidas estratégicamente con un motor de IA desarrollado en la Universidad de California, San Diego. Este sistema logró detectar un incendio en un bosque en pleno 2023 mientras aún era de madrugada, activando la alarma cerca de 45 minutos antes de que se hiciera un llamado de emergencia. Además de visión por cámara, la IA incorpora otros datos (índices de vegetación, mediciones infrarrojas desde drones o aviones) para anticipar posibles focos futuros y mapear las áreas de mayor vulnerabilidad [1]. Toda esta información se centraliza en plataformas de monitoreo en la nube: interfaces web o apps móviles muestran mapas interactivos de incidentes activos, históricos y predicciones de propagación, y permiten a autoridades recibir alertas automáticas. Estas plataformas, basadas en servicios GIS, mejoran la coordinación al superponer datos de distintas fuentes y al garantizar que la información crítica llegue rápidamente a los gestores de emergencia [3].

Limitaciones y adaptación en contextos rurales

A pesar de los avances tecnológicos, existen desafíos importantes, sobre todo en regiones rurales o periurbanas con infraestructura limitada. Los sensores IoT requieren energía (aunque sea solar/batería) y comunicación (cobertura móvil o gateways), recursos que no siempre están disponibles en ecosistemas montañosos o aislados. Montar una red exhaustiva de sensores puede ser inviable por costos y logística, y las redes mismas pueden sufrir interrupciones por el propio fuego o condiciones ambientales adversas [7]. En tales entornos, la dependencia exclusiva de satélites resulta insuficiente por las razones mencionadas (revisita, nubes) y la de drones se ve

restringida por autonomía de vuelo. Por eso, las soluciones emergentes se enfocan en enfoques híbridos y de bajo costo: por ejemplo, usar sensores comerciales baratos (MICROCONTROLADORES de código abierto, módulos LoRa) con alimentación solar y redes mesh, junto con infraestructura comunitaria para comunicaciones. Se suelen priorizar tecnologías robustas y de bajo consumo (LoRaWAN, NB-IoT o GSM celular) y optimizar el despliegue de nodos según microclima y patrones de vientos locales. En América Latina ya se han documentado proyectos piloto que combinan redes LoRa con retransmisión celular para garantizar que las alertas se envíen aun en áreas sin fibra óptica [7]. Estas experiencias muestran que, aunque la implementación masiva sea difícil, un sistema IoT estratégicamente ubicado (por ejemplo. en miradores o caminos de acceso) puede servir de complemento efectivo al monitoreo convencional. En conjunto, el panorama global indica que la detección más efectiva combina observaciones satelitales amplias, redes de sensores locales y análisis inteligente de datos. En zonas rurales vulnerables, la adaptación tecnológica –optimizando costos, energía y comunicaciones– es crucial para acercar estas capacidades avanzadas a comunidades con menor infraestructura. Esto justifica el desarrollo de soluciones IoT de bajo costo y específicas para cada ecosistema, tal como el sistema propuesto en esta tesis.

2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

2.1 Problemática

Los cerros de Santiago de Cali, especialmente Cristo Rey y el Cerro de las Tres Cruces son áreas de alta susceptibilidad a incendios forestales debido a factores tanto naturales como antrópicos y es que, los climas secos y las actividades humanas ha hecho que se aumente significativamente el riesgo de incendios en estas zonas [9]. Estos incendios representan una gran amenaza para la biodiversidad, la calidad del aire y la seguridad de las comunidades locales [10].

Según un estudio realizado por las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la temperatura global ha aumentado en un 1.1°C desde el siglo XIX [11] y, según el Ideam y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible en Colombia se incrementarán 0.9°C más para el 2040 [12]. Este

incremento de temperatura, junto a fenómenos climáticos como El Niño, ha creado que las condiciones del planeta sean más propensas a los incendios forestales [13].

En 2024, en el mes de septiembre, en un solo fin de semana se atendieron 20 incendios forestales entre el cerro de Cristo Rey y el parque nacional natural Farallones, algunos de estos incendios duraron más de 50 horas [14], provocando que se vean afectadas la vegetación, la fauna local (incluida su hábitat y alimentación) y la salud de los habitantes del sector [15]. Por otro lado, en sólo el mes de enero de ese año, el cuerpo de Bomberos de la ciudad reportó 44 incendios forestales, en donde se consumieron 17 hectáreas de bosques afectando así la biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporcionan los cerros [16].

En 2025, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), en conjunto con la Fuerza Aérea Colombiana, identificó nueve puntos críticos altamente vulnerables a incendios forestales en el área de Cristo Rey y los cerros aledaños, concluyendo que el 55 % de los eventos recientes se localizan dentro de Reservas Forestales Protectoras [17]. Esta información reafirma la fragilidad ecológica del territorio y la urgencia de fortalecer las estrategias de prevención, monitoreo y respuesta temprana ante incendios.

Por su parte, las alertas emitidas por el IDEAM durante la temporada seca de 2025 ubicaron al municipio de Santiago de Cali en nivel de alerta roja por riesgo de incendios de cobertura vegetal, evidenciando la reiteración de condiciones críticas y la necesidad de mecanismos de vigilancia ambiental más eficaces.

Entre las zonas más vulnerables identificadas por la CVC se encuentran el Cerro de la Bandera, Palermo, Terrón Colorado, Altos de Menga, Pilas de Cabuyal (incluye Cristo Rey, Normandía y Golondrinas), Loyola, La Castilla, La Cajita, Patio Bonito (en el corregimiento Pichindé, sector El Morro) y Los Andes. Estas áreas conforman una franja ecológica de importancia estratégica para la ciudad, pero actualmente expuesta a un deterioro acelerado y a un riesgo creciente de incendios forestales.



Ilustración 1 Zonas vulnerables a incendios forestales en Santiago de Cali

A pesar de la gravedad de estos incendios, la detección y respuesta siguen dependiendo en gran medida de reportes ciudadanos o vigilancia manual, lo que limita la capacidad de reacción temprana. La ausencia de un sistema automatizado de monitoreo dificulta la identificación oportuna de cambios en las condiciones ambientales que pueden indicar el inicio de un incendio. En otros países, el uso de sensores inalámbricos (WSN) para la medición en tiempo real de temperatura, humedad, humo y viento ha demostrado ser una herramienta efectiva para reducir el tiempo de detección y mejorar la respuesta ante emergencias forestales [18].

Frente a este contexto, surge la necesidad de implementar un sistema de monitoreo temprano que permita la detección rápida y efectiva de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali. Un sistema basado en sensores IoT puede ofrecer una solución innovadora y eficiente, permitiendo detectar el inicio de incendios y activar mecanismos de mitigación de manera autónoma. Esto no solo agilizaría la respuesta de los bomberos, sino que también contribuiría a la protección de estos ecosistemas críticos, reduciendo el impacto del cambio climático en estas áreas naturales.

En este escenario, donde los incendios forestales continúan aumentando en frecuencia y severidad, y donde las herramientas de vigilancia dependen aún de reportes manuales o mecanismos reactivos, se hace evidente la necesidad de explorar soluciones tecnológicas accesibles, sostenibles y adaptadas a las condiciones de los cerros tutelares de Santiago de Cali. La ausencia de sistemas automatizados de monitoreo ambiental, sumada a la vulnerabilidad ecológica de la zona y a las limitaciones institucionales para implementar vigilancia permanente, plantea interrogantes sobre cómo integrar herramientas IoT de bajo costo que permitan anticipar condiciones críticas y reducir los tiempos de respuesta ante un posible incendio.

En este sentido, surge la siguiente pregunta de investigación, que orienta el desarrollo del presente trabajo:

¿Cómo puede conceptualizarse y validarse un sistema IoT de bajo costo para la detección temprana de incendios forestales que integre arquitecturas eficientes, tecnologías de comunicación adecuadas para zonas rurales o periurbanas y estrategias de optimización basadas en experiencias previas documentadas en la literatura científica?

2.2 Justificación

La detección temprana de incendios forestales mediante sistemas IoT (Internet of Things) representa una alternativa tecnológica eficiente para la vigilancia continua y automatizada de ecosistemas vulnerables, reduciendo significativamente el tiempo de reacción ante emergencias sin depender de la intervención humana directa.

En este contexto, el presente proyecto propone el diseño y simulación de un sistema IoT de bajo costo, orientado a la detección temprana de incendios en los cerros tutelares de Santiago de Cali. El sistema se fundamenta en la integración de sensores ambientales (temperatura, humedad, humo y gases) conectados a una arquitectura distribuida capaz de recopilar, procesar y enviar datos en tiempo real hacia una plataforma en la nube. Esta infraestructura permitirá identificar patrones anómalos asociados al inicio de incendios forestales y generar alertas automáticas a las autoridades locales y comunidades cercanas.

La incorporación de modelos de Machine Learning aplicados sobre datos históricos y simulados fortalecerá la capacidad predictiva del sistema, permitiendo detectar condiciones críticas, anticipar la propagación del fuego y estimar los factores de riesgo más relevantes. A diferencia de las estrategias convencionales basadas únicamente en observación o vigilancia satelital, este enfoque combina sensado en tiempo real, análisis inteligente y comunicación en la nube, lo que facilita una respuesta temprana, precisa y escalable.

La elección de los cerros de Cristo Rey y Tres Cruces como área de estudio se justifica por su alta susceptibilidad a incendios, evidenciada por los múltiples eventos registrados en los últimos años y las alertas emitidas por el IDEAM y la CVC. La implementación de un sistema de monitoreo automatizado en estas zonas contribuirá directamente a la reducción del riesgo ambiental, la protección de la biodiversidad local y la mitigación del impacto del cambio climático sobre la ciudad.

Desde el punto de vista operativo, la automatización del monitoreo permitirá optimizar los recursos de emergencia, concentrando los esfuerzos únicamente en las áreas donde el riesgo sea real, lo que representa un ahorro significativo en recursos humanos y logísticos. Asimismo, se incrementará la seguridad del personal de primera respuesta al reducir la exposición a zonas peligrosas sin información previa sobre las condiciones del incendio.

En términos científicos y tecnológicos, este proyecto aporta al fortalecimiento de la infraestructura de investigación aplicada en detección ambiental y ciudades inteligentes, al integrar metodologías de simulación (Wokwi), desarrollo web (React + Firebase + Node-RED) y análisis de datos en la nube. La recopilación de datos ambientales simulados permitirá evaluar el rendimiento del sistema y establecer su nivel de madurez tecnológica (TRL), sirviendo como base para futuras implementaciones físicas en campo.

Por otra parte, el sistema propuesto incorpora una dimensión social y educativa mediante la plataforma web asociada, la cual promoverá la participación ciudadana y la apropiación del territorio. A través de estrategias de gamificación y visualización interactiva, la comunidad podrá aprender sobre prevención, detección y respuesta ante incendios, fortaleciendo así una cultura de corresponsabilidad ambiental en las zonas de mayor riesgo.

En conjunto, este proyecto busca no solo mitigar los efectos de los incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali, sino también consolidar un modelo de gobernanza tecnológica sostenible, basado en la integración entre ciencia, innovación y participación ciudadana. Este enfoque multidimensional representa un avance hacia la construcción de territorios más resilientes, inteligentes y comprometidos con la protección del medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Proponer un sistema IoT para la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali, evaluando su viabilidad técnica y nivel de madurez tecnológica (TRL).

3.2 Objetivos específicos

- **Diseñar la arquitectura conceptual del sistema IoT** para la detección temprana de incendios forestales, integrando sensores virtuales, procesamiento en la nube y una interfaz web de monitoreo.
- **Implementar y simular el funcionamiento del sistema IoT propuesto**, empleando entornos virtuales y herramientas de software que permitan analizar la comunicación entre sensores, plataforma de procesamiento y visualización de datos.
- **Evaluar la viabilidad técnica del sistema** simulado, determinando su grado de preparación para una futura implementación física en los cerros de Santiago de Cali.

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 Marco teórico

Esta sección incluye los conceptos teóricos asociados a la temática del proyecto con el objetivo de brindar un panorama general de las bases que lo sustentan.

4.1.1 Sensores IoT

En la era tecnológica del Internet de las Cosas (IoT), la conexión entre objetos físicos y virtuales busca mejorar la calidad de vida humana mediante aplicaciones avanzadas y el desarrollo de sensores, redes de comunicación y metodologías de procesamiento. Los sensores IoT desempeñan un papel crucial al recopilar datos tanto de sistemas funcionales internos como de factores ambientales externos. Estos sensores, generalmente conectados a unidades de microprocesamiento, almacenamiento, control, sistemas de energía e interfaces de comunicación inalámbrica, capturan cambios en tiempo real del entorno. Entre los sensores más utilizados se encuentran los de temperatura, presión, humedad, gas, aceleración, movimiento, imagen, ópticos y RFID. Los dispositivos de sensores IoT suelen ser compactos y tienen limitaciones en tamaño, capacidad de procesamiento, memoria y almacenamiento. Para la comunicación, emplean protocolos como Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, NFC y LTE/4G, permitiendo su integración en redes inalámbricas que no requieren infraestructura previa y que son capaces de autoorganizarse [19].

La comprensión de estas tecnologías es fundamental para el caso de los cerros tutelares de Santiago de Cali, donde las variaciones ambientales ocurren rápidamente y la topografía dificulta la vigilancia presencial. En un territorio donde la detección temprana depende de percibir aumentos súbitos de temperatura, caídas de humedad o presencia de gases derivados de combustión, los sensores IoT se convierten en una herramienta estratégica para superar las limitaciones de los sistemas tradicionales. Así, su integración en nodos distribuidos permite generar un monitoreo continuo, autónomo y económico, alineado con el propósito del sistema propuesto en esta investigación: captar señales tempranas de condiciones críticas y transmitirlos oportunamente para prevenir la propagación de incendios forestales.

4.1.2 Cloud Computing

La computación en la nube se refiere a la abstracción de recursos y servicios basados en la web que los desarrolladores de sistemas pueden utilizar para implementar soluciones complejas. Estos recursos en la nube suelen considerarse virtuales, lo que significa que, si un sistema necesita más recursos, como procesadores o espacio en disco, estos se pueden agregar bajo demanda y, generalmente, de manera transparente para la aplicación que los utiliza. Debido a su naturaleza virtual, las soluciones en la nube pueden escalarse de manera flexible, aumentando o reduciendo su tamaño según sea necesario. Las empresas que operan con soluciones en la nube solo pagan por los recursos que consumen, lo que les permite sustituir los costosos centros de datos físicos por alternativas escalables y con un modelo de pago por uso [20].

En el contexto de los cerros de Cali, donde la conectividad es intermitente y los recursos computacionales locales son limitados, la computación en la nube ofrece una infraestructura flexible para centralizar, almacenar y visualizar datos ambientales en tiempo real. Su capacidad de escalar dinámicamente y mantener disponibilidad constante resulta crucial para un sistema de alerta temprana basado en sensores distribuidos que requieren transmitir información de forma continua. Por ello, el uso de servicios en la nube como Firebase posibilita que los datos recolectados por los nodos IoT del proyecto sean accesibles desde cualquier dispositivo y se integren en una plataforma de monitoreo confiable y actualizada, reforzando la eficiencia y sostenibilidad de la solución propuesta.

4.1.3 Monitoreo remoto de variables ambientales

El monitoreo remoto de variables ambientales se ha convertido en una herramienta esencial para abordar los desafíos contemporáneos relacionados con la gestión medioambiental y la sostenibilidad. Este tipo de monitoreo permite recopilar información clave en tiempo real desde ubicaciones remotas, superando desafíos físicos y económicos asociados al monitoreo presencial. Además, facilita la innovación en sectores como la agricultura inteligente, la meteorología, la gestión de desastres naturales y los sistemas sostenibles [21].

La aplicación del monitoreo remoto resulta particularmente pertinente en los cerros tutelares debido a su amplia extensión y a la dificultad para mantener personal en campo de manera permanente. En estas áreas, donde los incendios pueden originarse en puntos alejados o de acceso complejo, la capacidad de supervisar variables críticas sin presencia humana inmediata representa una ventaja significativa. En este sentido, el sistema IoT diseñado en esta tesis articula el monitoreo remoto como herramienta para identificar patrones anómalos que indiquen condiciones de riesgo, permitiendo detectar oportunamente focos incipientes y optimizando la capacidad de respuesta de las autoridades y comunidades locales.

4.1.4 Incendios Forestales

Los incendios forestales son incendios que ocurren en ecosistemas terrestres y se propagan por la vegetación, incluyendo bosques, sabanas, matorrales, pastizales, humedales y turberas. Estos incendios pueden tener origen natural o antrópico y se caracterizan por su propagación sin control humano [22].

En contraste, las quemas prescritas son fuegos planificados y controlados utilizados para la gestión forestal, como el control de combustible, la regeneración de pastos o el manejo de plagas. También existen las quemas experimentales, que se realizan con fines de aprendizaje y estudio del comportamiento del fuego, sus efectos en los ecosistemas y para el entrenamiento de bomberos [22].

La ecología del fuego es la disciplina científica que estudia el papel de los incendios en los ecosistemas, analizando tanto los efectos como los procesos asociados antes y después de un incendio [22].

Comprender la dinámica de los incendios forestales, sus causas y su comportamiento es indispensable para diseñar mecanismos de prevención eficientes en territorios vulnerables como los cerros de Cali, donde la vegetación, el viento y la sequedad pueden favorecer la propagación rápida del fuego. Esta caracterización evidencia la necesidad de sistemas que vayan más allá de la vigilancia reactiva y permitan identificar señales tempranas antes de que los incendios se intensifiquen. Por ello, el presente proyecto incorpora los principios asociados a la ecología del fuego para fundamentar

el diseño de sensores, parámetros críticos y mecanismos de alerta incluidos en la arquitectura IoT propuesta.

4.1.5 Cambio climático

El cambio climático se refiere a las alteraciones en la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, observadas desde mediados del siglo XX. Estos cambios incluyen un aumento en las temperaturas extremas, el incremento de lluvias torrenciales en varias regiones, y la subida de los niveles extremos del mar [23].

Las proyecciones indican que estos eventos serán más intensos y frecuentes en las próximas décadas. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha estimado que la temperatura media global ya ha aumentado 1,1 °C respecto a los niveles preindustriales, y podría incrementarse entre 1,5 °C y 2,0 °C para 2050 si las emisiones continúan al ritmo actual. Además, la frecuencia de sequías extremas se ha triplicado desde el año 2000, mientras que los episodios de calor extremo son hoy cinco veces más probables que a finales del siglo XX. En regiones tropicales, se proyecta una reducción de hasta 20–30 % en la humedad del suelo durante las temporadas secas, factor que incrementa significativamente la inflamabilidad de la vegetación. Estos efectos afectan de manera desigual a las regiones y suelen tener un mayor impacto en comunidades vulnerables, independientemente de su nivel de desarrollo [23].

En los cerros tutelares, los efectos del cambio climático —como el aumento de temperaturas, la intensificación de periodos secos y la mayor frecuencia de eventos extremos— incrementan la probabilidad de ignición y aceleran la propagación del fuego. Esta realidad convierte la detección temprana en una necesidad urgente para proteger la biodiversidad y la vida humana en zonas aledañas. En este contexto, la solución IoT diseñada en el proyecto busca anticiparse a estos escenarios mediante la medición constante de variables que sirven como indicadores tempranos de riesgo, contribuyendo a mitigar los impactos ambientales que el cambio climático exacerba en la región.

4.1.6 Alerta temprana

La alerta temprana es un sistema diseñado para identificar, monitorear y comunicar amenazas potenciales antes de que se conviertan en desastres, permitiendo la implementación de medidas preventivas para minimizar impactos en vidas humanas, el medio ambiente y los bienes materiales. Según la ONU, los sistemas de alerta temprana son esenciales para la reducción del riesgo de desastres, ya que permiten tomar decisiones informadas basadas en la identificación y evaluación oportuna de amenazas [24].

Los sistemas de alerta temprana cobran especial relevancia en áreas como los cerros de Cali, donde las respuestas tardías pueden derivar en incendios de rápida expansión debido a la pendiente, el material vegetal y la accesibilidad limitada. Integrar la filosofía de la alerta temprana en un sistema IoT permite crear mecanismos automáticos que informan a comunidades y autoridades tan pronto como las condiciones ambientales superan umbrales críticos. De esta manera, el proyecto se articula con los principios internacionales de gestión del riesgo al proponer un sistema capaz de mejorar la anticipación, reducir el tiempo de reacción y minimizar la afectación de los ecosistemas.

4.1.7 Educación Ambiental

La educación ambiental es un proceso interdisciplinario y continuo que busca formar a las personas en el reconocimiento de valores, el desarrollo de conceptos, habilidades y actitudes necesarias para lograr una convivencia armónica entre los seres humanos, su cultura y el entorno. Esta educación puede ser formal, no formal o informal, dependiendo del contexto en que se imparta. Los objetivos principales de la educación ambiental incluyen sensibilizar a las personas sobre los problemas ambientales, involucrarlas en las realidades de su entorno, fomentar actitudes de conservación y respeto por la naturaleza y la cultura, desarrollar habilidades para encontrar soluciones a los problemas ambientales actuales y prevenir futuros, y promover acciones para corregir o evitar problemas ambientales. Además, la educación ambiental debe cumplir con principios como ser un proceso continuo, integrar diversas áreas del saber, fomentar la participación, el pensamiento crítico e innovador, y promover la formación de ciudadanos con conciencia local y global sobre los problemas ambientales. También debe ser un derecho de todas las personas, incluir la participación de los medios de comunicación y capacitar para resolver conflictos de manera justa y humana. Su

objetivo es lograr una sociedad más consciente y responsable con el medio ambiente, contribuyendo al desarrollo sostenible [25].

La educación ambiental constituye un componente esencial para cualquier estrategia de prevención en territorios como los cerros de Cali, donde el uso, ocupación y tránsito de personas influyen directamente en la ocurrencia de incendios. La incorporación de contenido educativo en la plataforma web del sistema propuesto busca no solo sensibilizar a los habitantes y visitantes, sino también fortalecer capacidades para que identifiquen riesgos, comprendan alertas y adopten conductas responsables con el entorno. De esta forma, la solución tecnológica se complementa con procesos formativos que potencian la corresponsabilidad ciudadana en la protección del territorio.

4.1.8 Participación ciudadana

La participación ciudadana en la gestión ambiental se refiere al involucramiento activo de la comunidad en las decisiones y acciones orientadas a la protección del entorno, considerándose un componente esencial para lograr una toma de decisiones más inclusiva y justa en asuntos ambientales [26]. En la era digital, este concepto se ha ampliado mediante aplicaciones tecnológicas, plataformas digitales y redes de sensores, que permiten a los ciudadanos contribuir en tiempo real al monitoreo ambiental y a sistemas de alerta temprana frente a desastres naturales como los incendios forestales [27]. Diversas iniciativas de ciencia ciudadana demuestran que la participación apoyada en tecnología no solo enriquece la base de conocimientos ambientales, sino que también *fomenta la conciencia ambiental* colectiva y una responsabilidad compartida en la prevención de riesgos ecológicos [28]. En conjunto, la integración de herramientas digitales en la participación ciudadana potencia la vigilancia comunitaria del medio ambiente y mejora la capacidad de respuesta ante emergencias, complementando los esfuerzos institucionales en la gestión del riesgo.

En los cerros tutelares, la participación ciudadana es clave, ya que las comunidades y visitantes suelen ser los primeros en percibir anomalías en el entorno. Integrar esta participación mediante herramientas digitales permite complementar la información captada por los sensores con reportes comunitarios, lo que fortalece la vigilancia distribuida y mejora la capacidad de respuesta. Así, el sistema IoT planteado incorpora este enfoque al ofrecer canales de reporte, visualización y

retroalimentación, promoviendo una gobernanza colaborativa del riesgo que conecta la tecnología con el conocimiento local y la acción comunitaria.

4.2 Estado del arte

4.2.1 Metodología de la Revisión Sistemática de Literatura

Este trabajo desarrolla su estado del arte mediante una metodología basada en una revisión sistemática de la literatura (RSL), siguiendo los lineamientos propuestos por Kitchenham y Charters [29], ampliamente utilizados en investigaciones de ingeniería y ciencias aplicadas. Esta metodología se ha adaptado a las características del estudio, con el objetivo de identificar, analizar y sintetizar de forma rigurosa los avances y vacíos existentes en la literatura sobre el uso de tecnologías IoT para la detección temprana de incendios forestales, con énfasis en su aplicabilidad en zonas periurbanas como los cerros de Santiago de Cali.

Los principales elementos considerados para aplicar esta metodología y desarrollar este trabajo se fundamentan en la definición de un conjunto de preguntas de investigación, que orientan la búsqueda y análisis de literatura relevante; en la formulación de criterios de inclusión y exclusión, que permiten delimitar qué estudios son pertinentes para responder a dichas preguntas; y en la estructuración de protocolos de búsqueda, los cuales establecen las bases para localizar, filtrar y seleccionar las fuentes más relevantes en bases de datos académicas y científicas. Estos componentes aseguran un proceso sistemático, transparente y replicable, que permite construir un panorama claro y fundamentado sobre el estado actual del conocimiento en torno al uso de sensores IoT para la detección temprana de incendios forestales.

4.2.2 Recursos de información y estrategias de búsqueda

Se definieron protocolos de búsqueda para explorar artículos científicos, tesis y capítulos de libros en diferentes bases de datos académicas y repositorios institucionales, con el fin de identificar estudios relacionados con las preguntas de investigación planteadas en el apartado anterior. Las fuentes seleccionadas corresponden a plataformas ampliamente reconocidas en el ámbito de la ingeniería, las tecnologías emergentes, la sostenibilidad ambiental y las ciudades inteligentes, así

como a repositorios universitarios que permiten acceder a investigaciones contextualizadas en el entorno colombiano. En la Tabla 1 se presentan los principales términos clave utilizados, así como las cadenas de búsqueda aplicadas en cada una de las bases consultadas.

Fuente / Base de datos	Cadena de búsqueda
Scopus / ScienceDirect	"forest fire detection" AND IoT AND sensors AND "early warning"
IEEE Xplore	"forest fire detection" "IoT" "early warning"
Google Scholar	"forest fire detection" "IoT" "early warning"
Repositorio UAO	“incendios forestales” AND “Cali”

Tabla 1 Protocolos de búsqueda

4.2.3 Criterios de inclusión y exclusión

Para la selección, filtrado y clasificación de los documentos revisados en el marco de esta revisión sistemática, se definió un conjunto de criterios de inclusión y exclusión. Estos criterios permitieron asegurar que los estudios seleccionados fueran pertinentes, actuales, accesibles y alineados con los objetivos de la investigación, centrada en el uso de tecnologías IoT para la detección temprana de incendios forestales. La Tabla 2 presenta en detalle estos criterios aplicados durante el proceso de depuración de fuentes.

Código	Criterio de inclusión	Código	Criterio de exclusión
IC1	Estudios centrados en la detección de incendios forestales mediante tecnologías IoT.	EC1	El documento no está disponible para su descarga o acceso completo.
IC2	Publicaciones realizadas entre 2020 y 2025.	EC2	Publicaciones anteriores al año 2020.
IC3	Estudios aplicados a contextos rurales, montañosos o de difícil acceso.	EC3	El IoT no es el foco principal del estudio.

IC4	Documentos en español o inglés.	EC4	El documento está en un idioma diferente a español o inglés.
IC5	Investigación primaria con validación empírica o técnica.	EC5	Estudios secundarios sin validación (resúmenes, reseñas, presentaciones, pósteres, etc.).
IC6	Acceso completo al texto del documento.		

Tabla 2 Criterios de inclusión y exclusión

4.2.4 Recuperación de datos

Para apoyar el proceso de recolección, organización y análisis de los documentos identificados durante la revisión sistemática, se utilizó una plantilla en Microsoft Excel diseñada para registrar los resultados de búsqueda obtenidos en cada base de datos y repositorio consultado. Esta herramienta permitió sistematizar la información recuperada, facilitando la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos, así como la trazabilidad del proceso. Para cada publicación registrada, se documentaron variables como: a) cadena de búsqueda utilizada, b) título del documento, c) autor(es), d) año de publicación, e) fuente o tipo de publicación, f) resumen, g) identificador DOI o enlace de acceso, y h) observaciones breves sobre la relevancia del contenido respecto a las preguntas de investigación (véase Anexo A: Matriz de revisión sistemática en Excel).

La búsqueda se realizó entre abril y octubre de 2025, arrojando un total de 221 documentos, de los cuales 48 fueron seleccionados como relevantes tras aplicar los filtros establecidos. La Tabla 4 presenta un resumen de los resultados obtenidos por cada fuente de información consultada, incluyendo el número total de publicaciones encontradas y la cantidad de documentos seleccionados como pertinentes para el análisis.

Fuente / Base de datos	Resultados de la búsqueda	Documentos relevantes
Scopus	114	8
ScienceDirect	13	3
IEEE Xplore	18	14

Google Scholar	944 (70)	21
Repositorio UAO	6	2

Tabla 3 Resumen de resultados

4.2.5 Análisis de resultados

La revisión sistemática de la literatura permitió identificar patrones relevantes sobre el uso de tecnologías y arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT) aplicadas a la detección temprana de incendios forestales, las tecnologías de comunicación utilizadas para garantizar la conectividad en áreas rurales o periurbanas, así como las principales limitaciones y retos reportados en la implementación de estos sistemas. Los hallazgos se organizan de acuerdo con las preguntas de investigación planteadas.

- **Tecnologías y arquitecturas IoT para la detección temprana de incendios**

Los artículos analizados demuestran que la integración del Internet de las Cosas (IoT) se ha consolidado como una herramienta clave en la detección temprana de incendios forestales, permitiendo la recolección, transmisión y análisis de datos ambientales en tiempo real. Las arquitecturas más utilizadas siguen un enfoque jerárquico de tres capas —sensado, red y aplicación—, donde los sensores recopilan variables críticas como temperatura, humedad, concentración de gases, presencia de humo y flama. Estas variables se procesan localmente o en la nube mediante técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático.

Varios estudios implementan arquitecturas basadas en microcontroladores de bajo costo, como Arduino Uno, NodeMCU (ESP8266) o ESP32, combinados con sensores DHT11, MQ2, y módulos de detección de llama e infrarrojos. Estos sistemas permiten monitoreo continuo y alertas automáticas en tiempo real [30].

Otros trabajos han optado por redes de sensores inalámbricos (WSN) optimizadas con topologías híbridas, como la circular/estrella, que reducen la latencia y el consumo energético hasta en un 80 % frente a las mallas tradicionales [31]. En estos casos, los nodos sensoriales no sólo capturan

información ambiental, sino que también ejecutan funciones de preprocesamiento para filtrar ruido y priorizar datos relevantes antes de transmitirlos.

Asimismo, se observa una tendencia hacia la incorporación de aprendizaje automático (machine learning) y deep learning para mejorar la precisión en la detección y reducir falsos positivos. Algunos autores emplean redes neuronales multicapa (MLP) para clasificar escenarios de incendio y predecir su evolución [32], mientras que otros utilizan arquitecturas híbridas basadas en CNN y visión por computadora para distinguir visualmente entre humo y fuego [33].

Por otra parte, las arquitecturas fog computing y edge computing aparecen como soluciones emergentes para disminuir la dependencia de la nube y los problemas de latencia, procesando los datos en el borde de la red o en nodos intermedios [34] [35]. Estas configuraciones permiten respuestas más rápidas y autónomas, incluso en entornos sin conectividad constante, lo cual resulta especialmente relevante en contextos rurales o de difícil acceso. Por otro lado, algunos modelos incorporan mecanismos de mitigación automática, como aspersores o servomotores que se activan ante detecciones confirmadas, lo que convierte a estos sistemas en plataformas no solo de monitoreo, sino también de respuesta temprana [36].

En el contexto de los cerros tutelares de Santiago de Cali, estas arquitecturas representan una oportunidad viable por su bajo costo y modularidad. La posibilidad de desplegar nodos IoT de energía solar en puntos estratégicos permitiría monitorear variables críticas como temperatura, humedad y gases, integrando los datos en plataformas abiertas como ThingSpeak o Node-RED para su visualización en tiempo real. Además, el uso de fog computing podría reducir la dependencia de la conectividad continua, una limitación frecuente en las laderas y zonas rurales del oeste de la ciudad. De esta forma, un sistema local adaptado a las condiciones topográficas y climáticas de Cali permitiría desarrollar una red de vigilancia autónoma y comunitaria, que complemente los esfuerzos de la CVC, los Bomberos y los ciudadanos.

- **Tecnologías de comunicación empleadas en contextos rurales y periurbanos**

La comunicación es un aspecto crítico para garantizar la eficacia de los sistemas IoT de detección de incendios. En los contextos rurales o periurbanos, donde la conectividad tradicional es limitada,

los estudios muestran una amplia diversidad de tecnologías adaptadas según la topografía, la cobertura disponible y el tipo de datos transmitidos.

En entornos con escasa infraestructura, LoRa y LoRaWAN se consolidan como las tecnologías más eficientes por su bajo consumo energético y su amplio rango de transmisión (hasta 15 km), siendo ideales para redes de sensores desplegadas en áreas boscosas [37] [38]. Por otro lado, en regiones con conectividad moderada, se prioriza el uso de módulos GSM/GPRS o 2G, que garantizan la comunicación con servidores IoT mediante redes celulares, incluso en zonas donde las tecnologías más modernas no están disponibles [34][30]. En contextos más urbanos o periurbanos, algunos autores integran WiFi o ZigBee para la transmisión de datos entre nodos cercanos y hacia pasarelas de comunicación, aprovechando su mayor ancho de banda para enviar información multimedia, como imágenes o video [31].

El uso de plataformas en la nube, como ThingSpeak o Blynk, es recurrente para la centralización de datos, visualización de gráficas en tiempo real y emisión de alertas automáticas a través de aplicaciones móviles. Estos sistemas, combinados con servicios de mensajería basados en MQTT Broker, logran tiempos de respuesta promedio de 2 a 5 segundos, favoreciendo la toma de decisiones rápida y coordinada entre autoridades y cuerpos de emergencia.

En general, la selección de la tecnología de comunicación depende del balance entre cobertura, latencia y consumo energético, siendo LoRa y GSM las opciones predominantes en áreas rurales, mientras que ZigBee y WiFi se aplican en zonas periurbanas o mixtas. Los cerros occidentales de Cali presentan condiciones de conectividad fragmentada, con cobertura celular intermitente y ausencia de redes WiFi estables. En este contexto, la adopción de LoRaWAN o GSM de baja frecuencia (2G/3G) sería la alternativa más adecuada para garantizar comunicación entre nodos sin requerir infraestructura costosa. Además, el despliegue de gateways LoRa en puntos elevados como Cristo Rey o Terrón Colorado permitiría ampliar el rango de cobertura hacia zonas críticas como La Castilla o Golondrinas. Complementariamente, el uso de plataformas locales de monitoreo, en lugar de servicios totalmente en la nube, permitiría operar de forma más autónoma ante fallas de conectividad, fortaleciendo la capacidad de respuesta del sistema de alerta temprana propuesto para la región.

- **Limitaciones, retos y fallos en la implementación de sistemas IoT**

Aunque los avances en IoT y aprendizaje automático han mejorado significativamente la detección temprana de incendios, los estudios identifican limitaciones recurrentes relacionadas con la conectividad, el mantenimiento energético, la seguridad de los datos y la escalabilidad.

Una de las principales dificultades radica en la falta de infraestructura de red en zonas rurales y montañosas, lo que provoca pérdida de datos o retrasos en la transmisión. Además, muchos dispositivos dependen de baterías convencionales que requieren mantenimiento frecuente, por lo que se recomienda incorporar paneles solares y sistemas de gestión energética autónomos [39] [38]

Otro reto importante es la precisión de los sensores y algoritmos, especialmente en condiciones ambientales extremas. Algunos estudios evidencian falsos positivos causados por fluctuaciones térmicas o partículas suspendidas, lo que resalta la necesidad de calibrar los sensores y combinar distintas fuentes de datos.

Asimismo, se menciona la seguridad de los datos y la privacidad, ya que los sistemas IoT pueden ser vulnerables a ataques o manipulación remota, particularmente cuando operan mediante redes abiertas [35]. Finalmente, el mantenimiento y reemplazo de sensores en zonas boscosas de difícil acceso constituye un desafío operativo que limita la sostenibilidad de estos proyectos a largo plazo.

En los cerros de Cali, estas limitaciones son particularmente evidentes debido a la topografía accidentada, la humedad variable y la vegetación densa, que afectan la calibración de sensores y la estabilidad de las comunicaciones. Además, los constantes cortes eléctricos en los corregimientos rurales y la ausencia de fuentes energéticas estables subrayan la necesidad de sistemas autosuficientes alimentados por energía solar. Otro aspecto crítico es la sostenibilidad a largo plazo: la instalación de nodos IoT requiere estrategias de participación ciudadana y corresponsabilidad comunitaria, donde actores como los habitantes de zonas aledañas, las juntas de acción comunal y los grupos de voluntariado ambiental puedan realizar labores básicas de mantenimiento o verificación. En este sentido, la combinación de tecnología y acción comunitaria se perfila como un enfoque clave para el éxito de la implementación local.

4.2.6 Síntesis comparativa del estado del arte y vacíos identificados

En síntesis, los estudios revisados muestran que los sistemas de detección temprana de incendios forestales suelen integrar sensores ambientales multiparámetro —particularmente temperatura, humedad y gases— combinados con microcontroladores de bajo consumo energético conectados mediante tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, ZigBee o redes LPWAN, dependiendo de las condiciones topográficas y de cobertura. En el ámbito del procesamiento, muchos trabajos incorporan modelos de inteligencia artificial para reducir falsos positivos y mejorar la predicción del riesgo, empleando algoritmos de clasificación, fusiones de datos o análisis térmico avanzado. Algunos estudios avanzan hacia dimensiones complementarias como seguridad de datos, autonomía energética y gobernanza comunitaria, aunque con menor profundidad, priorizando aún enfoques altamente técnicos y poco orientados a la sostenibilidad operativa. Si bien estos sistemas reportan resultados prometedores —como disminución de tiempos de detección, mayor precisión sensorial o mejora en la estabilidad de transmisión— también reconocen fallas recurrentes asociadas a limitaciones de conectividad, mantenimiento energético y escalabilidad en escenarios rurales o montañosos, lo que restringe su implementación práctica. Frente a ello, se identifica un vacío específico en la literatura aplicada al contexto de Cali, donde las condiciones de los cerros tutelares exigen soluciones de bajo costo, autosuficientes y adaptadas a la topografía, pero también articuladas con procesos de participación ciudadana, educación ambiental y modelos híbridos de gobernanza del riesgo. Este trabajo busca contribuir a dicho vacío mediante el diseño y validación por simulación de un sistema IoT capaz de operar bajo restricciones reales del territorio, integrando monitoreo ambiental, analítica predictiva y un enfoque sociotécnico alineado con la realidad local.

5. METODOLOGÍA

El presente trabajo de grado adopta un enfoque mixto, con énfasis en el diseño tecnológico y validación por simulación. La investigación combina elementos de ingeniería aplicada, análisis documental y pruebas funcionales en entornos virtuales para proponer un sistema IoT destinado a la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali. La estrategia metodológica busca equilibrar la rigurosidad técnica con la pertinencia social, mediante la construcción de un prototipo funcional y la incorporación futura de actores del territorio en su validación contextual.

El enfoque metodológico de este trabajo articula dos dimensiones complementarias. La primera corresponde a una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) orientada al mapping de tecnologías IoT aplicadas a la detección temprana de incendios forestales, esta revisión permite identificar sensores utilizados, arquitecturas, protocolos de comunicación, modelos de IA, resultados reportados y limitaciones de implementación, especialmente en contextos rurales o periurbanos similares al de los cerros de Santiago de Cali. La segunda dimensión corresponde al diseño tecnológico del sistema propuesto, el cual se desarrolla bajo un enfoque de engineering design research y se valida mediante simulación funcional en entornos digitales (Wokwi, Node-RED y Firebase). Estas dos fases no operan de forma aislada: los hallazgos del mapeo sistemático orientan las decisiones técnicas del diseño (selección de sensores, topología de red, requerimientos de energía, flujos de datos y estrategias de alerta), mientras que la simulación permite contrastar estos criterios con un prototipo funcional que demuestra la coherencia y aplicabilidad de la solución. En este sentido, el estudio se clasifica como un diseño de solución con validación conceptual en entorno simulado, propio de desarrollos ubicados en niveles tempranos de madurez tecnológica (TRL 2–3), donde el objetivo principal es comprobar la viabilidad técnica y la consistencia lógica de la arquitectura antes de avanzar hacia pruebas físicas en campo.

Dado el carácter iterativo, exploratorio y centrado en la experiencia del usuario del proyecto, se emplea una adaptación de metodologías ágiles, particularmente inspirada en los principios de ScrumXP y Lean UX. Estas metodologías promueven ciclos cortos de desarrollo, validaciones rápidas, flexibilidad ante el cambio y un fuerte enfoque en la retroalimentación continua, aun cuando el trabajo sea ejecutado por una sola persona [40][41]. Asimismo, se integran prácticas del diseño

centrado en el usuario (DCU) para asegurar la alineación de la solución con las necesidades reales del entorno [42].

El desarrollo del proyecto se organiza en cuatro fases metodológicas, cada una orientada a avanzar de manera progresiva desde el análisis contextual hasta la validación conceptual del sistema propuesto:

Fase 1 – Diseño conceptual del sistema IoT

En esta fase se desarrolla la arquitectura lógica del sistema, definiendo sus componentes a través de una estructura por capas: sensado, procesamiento local, comunicación, almacenamiento y visualización, y analítica predictiva. Se identifican las tecnologías, herramientas y plataformas más apropiadas para cada nivel del sistema, priorizando criterios de accesibilidad, compatibilidad con simuladores, bajo costo y posibilidad de réplica. Esta fase incluye la construcción de diagramas técnicos que representan los flujos de información, los dispositivos involucrados y las relaciones entre módulos, con el propósito de establecer un marco coherente para las siguientes etapas de simulación e integración. También se construye una base conceptual sustentada en literatura especializada, que guía las decisiones de diseño.

Como resultado de esta fase, se generan diagramas de arquitectura y flujos de información, fundamentales para visualizar la estructura del sistema y garantizar coherencia entre sus componentes antes de pasar a la simulación. Estos diagramas permiten identificar las dependencias técnicas, anticipar posibles fallos de diseño y establecer un lenguaje común para el desarrollo posterior. Asimismo, se obtiene un documento de fundamentación conceptual que justifica cada decisión tomada a partir de la literatura especializada, lo cual asegura que las elecciones tecnológicas y metodológicas no son arbitrarias, sino que responden a evidencia científica y a prácticas recomendadas en investigaciones previas. En conjunto, estos entregables constituyen la base estructural y teórica que orienta las fases siguientes.

Fase 2 – Simulación e implementación en entorno virtual

Esta fase está dedicada al desarrollo de una simulación funcional del sistema a partir de los lineamientos definidos en la fase anterior. Se configuran entornos de simulación que permiten

emular la lectura de variables ambientales, la comunicación entre dispositivos y el almacenamiento de datos en la nube. Para ello, se seleccionan plataformas que permiten replicar comportamientos reales del sistema IoT, tales como Wokwi, Node-RED y Firebase. Además, se construyen los flujos de datos que conectan cada componente simulado, estableciendo los protocolos de comunicación (MQTT, HTTP) y verificando su interoperabilidad. Esta etapa permite observar de forma anticipada el comportamiento operativo del sistema, validar su lógica de funcionamiento y preparar el terreno para una futura transición a prototipos físicos.

Los principales entregables de esta fase son los prototipos simulados de los nodos IoT, los flujos de datos implementados en herramientas como Node-RED y los registros funcionales obtenidos en Firebase. Cada uno de estos productos cumple un propósito metodológico específico: los prototipos en Wokwi permiten evaluar el comportamiento de los sensores en un entorno controlado; los flujos de comunicación validan la interoperabilidad entre capas del sistema; y los registros en la nube evidencian la correcta transmisión y almacenamiento de los datos. Estos entregables son esenciales para demostrar que la arquitectura diseñada en la fase anterior es técnicamente operable y que los componentes del sistema pueden comunicarse entre sí antes de avanzar hacia etapas más complejas.

Fase 3 – Integración tecnológica y modelado analítico

Esta fase tiene como propósito articular la arquitectura IoT con herramientas de procesamiento, análisis y visualización de datos. Se desarrolla una aplicación web que simula la interacción de los distintos usuarios del sistema (institucionales, comunitarios y académicos), y se establece su conexión conceptual con la información recolectada desde los sensores. Asimismo, se integra un modelo predictivo previamente entrenado con datos históricos sobre incendios y condiciones meteorológicas, con el fin de ilustrar el potencial del sistema para anticipar riesgos. Esta fase permite proyectar una visión completa e integrada del sistema, desde la recolección de datos hasta su análisis y visualización.

Esta fase produce como entregables un prototipo de aplicación web, un dashboard de visualización de datos y un modelo predictivo integrado conceptualmente al flujo del sistema. La aplicación web permite simular la interacción real de usuarios institucionales, comunitarios y académicos, y aunque trabaja con datos simulados, evidencia cómo estos se transformarían en información útil. El

dashboard muestra de manera integrada valores de sensores, alertas y predicciones, lo que permite validar la lógica de visualización y las posibilidades analíticas del sistema. Finalmente, el modelo predictivo funciona como un componente demostrativo que ilustra la capacidad del sistema para anticipar escenarios de riesgo. Estos entregables permiten evaluar el sistema como un todo, conectando el funcionamiento técnico con su aplicación práctica.

Fase 4 – Evaluación de viabilidad y planificación de implementación futura

En esta última fase se plantea una evaluación estructurada de la viabilidad técnica del sistema, considerando criterios como modularidad, replicabilidad, escalabilidad y pertinencia contextual. Se aplica una metodología para estimar el nivel de madurez tecnológica (Technology Readiness Level - TRL), con base en estándares internacionales adaptados a proyectos tecnológicos en fase de simulación. Finalmente, se formula una propuesta metodológica para la futura implementación física del sistema, la cual incluye lineamientos para su validación en campo, participación de actores locales, identificación de riesgos y estrategias de mitigación.

Como entregables de esta etapa se generan una matriz de evaluación de viabilidad técnica, un informe de estimación del TRL y una propuesta metodológica para la implementación futura del sistema. La matriz de viabilidad permite analizar de manera estructurada la capacidad del sistema para ser escalado, replicado o adaptado a otros territorios. El reporte del TRL ubica el desarrollo en su nivel real de madurez tecnológica, aportando evidencia objetiva para justificar futuras fases de experimentación física. Finalmente, la propuesta metodológica incluye lineamientos para pruebas piloto, participación de actores locales, gestión de riesgos y estrategias de mitigación, lo que sirve como puente entre la simulación y la eventual implementación en campo. Estos entregables cierran el ciclo metodológico demostrando la coherencia, factibilidad y proyección del sistema.

Con el fin de representar gráficamente la planeación del proyecto, se elaboró un diagrama de Gantt que abarca el periodo comprendido entre el 15 de septiembre y el 22 de octubre de 2025. En él se distribuyen las actividades de cada semana, organizadas por fases y diferenciadas por colores, lo cual permite visualizar de manera clara la secuencia temporal de las tareas, la duración estimada de cada una y su relación con los objetivos planteados.

Este diagrama facilita el seguimiento del cronograma, la gestión del tiempo y la comunicación de los avances, constituyéndose en una herramienta fundamental para asegurar el cumplimiento de los entregables en el plazo establecido.

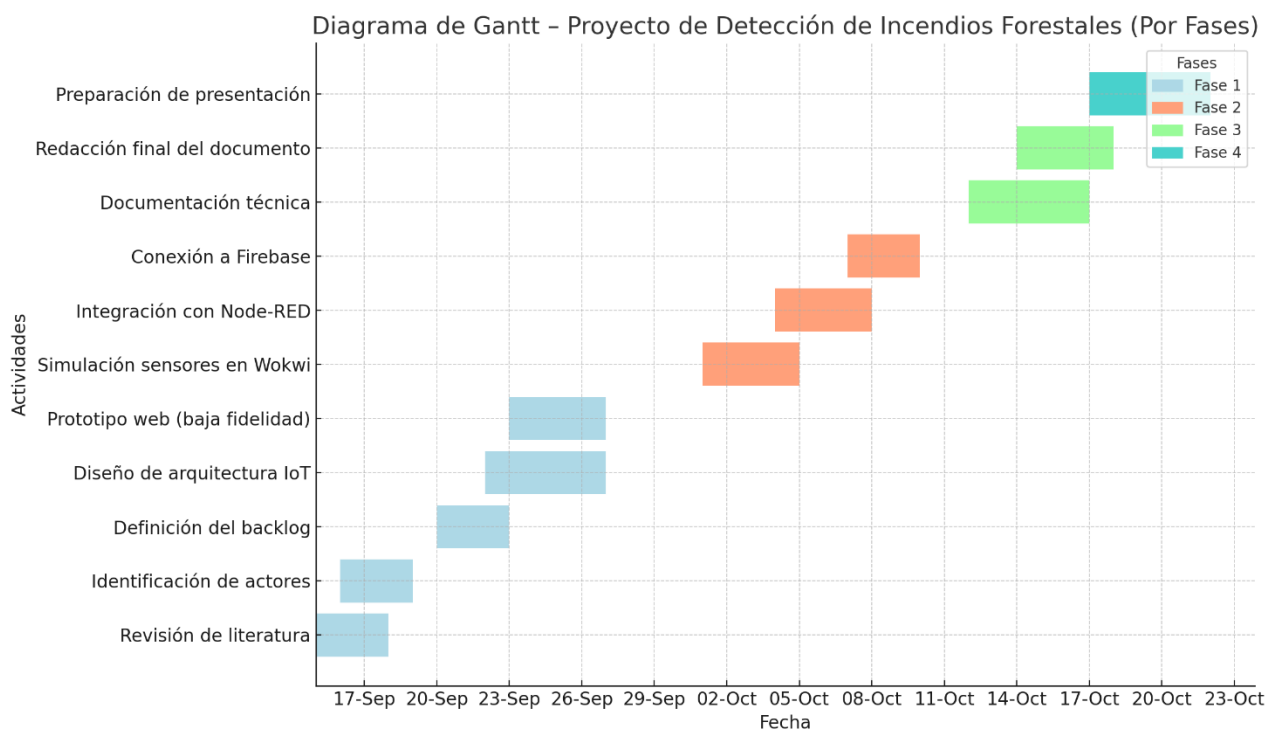


Ilustración 2 Diagrama Gantt

6. RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados esperados del proyecto se estructuran en cuatro dimensiones —técnica, ambiental, institucional y comunitaria— con el fin de evidenciar la contribución de cada componente del sistema IoT al cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación. Esta organización permite mostrar cómo la validación en simulación del prototipo se proyecta hacia futuras implementaciones físicas y hacia un esquema integral de gestión del riesgo en los cerros de Santiago de Cali.

6.1 Dimensión técnica

En la dimensión técnica, se espera validar la arquitectura IoT propuesta mediante la simulación funcional de los nodos de sensado en Wokwi y su integración con los componentes de procesamiento y visualización. A través de la transmisión de datos en tiempo real hacia Node-RED y Firebase, se anticipa demostrar que el flujo extremo a extremo —desde la captura de variables ambientales hasta su representación en una interfaz web— opera de manera correcta y estable. Este resultado permitirá confirmar la interoperabilidad de los distintos módulos del sistema y su coherencia con el diseño conceptual planteado. Asimismo, se proyecta evaluar preliminarmente el nivel de madurez tecnológica (TRL) alcanzado por la solución, situándola en una etapa correspondiente a tecnologías validadas en laboratorio, donde los componentes han sido integrados y verificados en un entorno controlado con condiciones similares a las del escenario real. Esta validación permitirá evidenciar que la transición hacia hardware físico sería factible con cambios mínimos, dado que tanto el microcontrolador (ESP32) como los protocolos de comunicación utilizados (MQTT, HTTP) corresponden a estándares aplicables directamente en campo. En conjunto, estos resultados técnicos permitirán demostrar que el sistema se encuentra preparado para avanzar hacia etapas de pilotaje físico en entornos reales.

6.2 Dimensión ambiental

En la dimensión ambiental, se espera que el prototipo simulado muestre el potencial del sistema para detectar condiciones precursoras de incendios forestales, tales como incrementos abruptos de temperatura, presencia de gases combustibles o señales directas de flama. La activación de alertas bajo estas condiciones permitirá validar que la arquitectura propuesta responde adecuadamente al objetivo central del proyecto: identificar tempranamente eventos críticos que puedan derivar en incendios. De manera complementaria, se proyecta evidenciar la utilidad del componente predictivo basado en datos históricos de focos de calor (NASA FIRMS) y variables meteorológicas locales. Este modelo permitirá estimar niveles de riesgo antes de que ocurra un evento, reforzando el carácter preventivo del sistema y demostrando que la detección temprana puede complementarse con análisis anticipatorios para mejorar la gestión del riesgo. Así, el proyecto ofrecerá un sistema con doble capacidad: reaccionar a señales inmediatas captadas por sensores y anticipar escenarios críticos

mediante analítica de datos, contribuyendo a la protección de los ecosistemas vulnerables de los cerros tutelares.

6.3 Dimensión institucional

En la dimensión institucional, los resultados esperados incluyen la generación de evidencia técnica suficiente para respaldar futuras decisiones de política, inversión o pilotaje por parte de entidades como la CVC, el DAGMA, los cuerpos de Bomberos o instituciones académicas. La documentación clara de la arquitectura IoT, la estructura de los flujos en Node-RED y la organización de datos en Firebase permitirá ofrecer un recurso valioso para su reproducción, escalamiento o integración con sistemas existentes de monitoreo ambiental. Asimismo, el prototipo demostrará que la solución es técnicamente viable, de bajo costo y escalable, características esenciales para que actores institucionales consideren su implementación en corredores ambientales críticos. Los resultados esperados en esta dimensión buscan posicionar el proyecto como una alternativa factible dentro de las estrategias locales de gestión del riesgo, aportando un insumo sólido para estructurar fases posteriores de pilotaje físico y evaluación en campo.

6.4 Dimensión comunitaria

En la dimensión comunitaria, se espera que la aplicación web prototipo evidencie su potencial como herramienta accesible de visualización de datos, comunicación del riesgo y participación ciudadana. Aunque en esta etapa la interacción comunitaria no se implementa plenamente, la simulación permitirá mostrar que el sistema puede ofrecer información en tiempo real de manera comprensible para usuarios diversos, facilitando la apropiación del territorio y promoviendo la sensibilización frente a los incendios forestales. La existencia de un panel pensado para ciudadanos, autoridades y actores académicos sugiere que, en fases futuras, la plataforma podría ampliarse para incorporar reportes ciudadanos y validar eventos de manera colaborativa, integrando así capacidades locales al proceso de vigilancia ambiental. Los resultados esperados en esta dimensión destacan que la solución no solo es tecnológica, sino también social, y que su diseño contempla la construcción de un ecosistema participativo que fortalezca la capacidad de respuesta ante emergencias.

Finalmente, la convergencia de estas cuatro dimensiones permitirá establecer una base sólida para futuras implementaciones físicas del sistema. Al validar la arquitectura en simulación, demostrar la pertinencia ambiental de la solución, aportar evidencia reproducible para actores institucionales y anticipar espacios de participación comunitaria, el proyecto se consolidará como una solución integral con potencial real de contribuir a la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali.

7. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Los incendios forestales en los cerros tutelares de Santiago de Cali, como Cristo Rey, Tres Cruces y Golondrinas, representan una amenaza ambiental y social crítica, intensificada por el cambio climático, la expansión urbana no planificada y las acciones humanas negligentes. La falta de un sistema de vigilancia automatizado y continuo en estas áreas impide una detección temprana y oportuna de los focos de incendio, lo que agrava su propagación y dificulta la acción rápida por parte de las autoridades y las comunidades locales.

Actualmente, la respuesta a estos eventos depende en gran medida de la vigilancia visual, alertas comunitarias o el uso de imágenes satelitales con demoras considerables. Esta situación limita la capacidad de reacción temprana, incrementa el riesgo para la biodiversidad, la infraestructura natural, la salud pública y la seguridad de los ecosistemas protegidos.

En este contexto, se hace evidente la necesidad de una solución tecnológica accesible, adaptable y centrada en la prevención. La propuesta aquí desarrollada busca cerrar esa brecha mediante un sistema de monitoreo inteligente, de bajo costo, que permita anticipar condiciones críticas y emitir alertas tempranas en tiempo real.

La solución planteada —un sistema IoT de bajo costo para la detección temprana de incendios forestales— se fundamenta en la necesidad urgente de fortalecer las capacidades de monitoreo y respuesta ante eventos críticos en zonas de alta vulnerabilidad ambiental, como los cerros tutelares

de Santiago de Cali. Esta propuesta resulta pertinente por múltiples razones técnicas, sociales y contextuales:

En primer lugar, el uso de sensores IoT distribuidos permite la vigilancia continua y automatizada del entorno, lo que mejora significativamente la capacidad de anticipar condiciones favorables para la ignición, tales como temperaturas elevadas, baja humedad y presencia de gases inflamables. A diferencia de los métodos tradicionales —como las patrullas visuales o la vigilancia satelital—, el sistema propuesto ofrece detección en tiempo real y localización precisa, reduciendo drásticamente los tiempos de reacción.

En segundo lugar, el sistema se diseña sobre tecnologías de bajo costo y bajo consumo energético, lo que facilita su implementación en zonas periurbanas y rurales con acceso limitado a infraestructura eléctrica o de conectividad. La arquitectura contempla la comunicación mediante LoRa, el procesamiento inicial en dispositivos ESP32 y la transmisión hacia plataformas en la nube como Node-RED y Firebase, lo que permite un monitoreo descentralizado, escalable y accesible.

Además, la propuesta se complementa con una plataforma web interactiva orientada a distintos actores sociales: comunidades locales, autoridades ambientales y entes de gestión del riesgo. Este enfoque fomenta la participación ciudadana, la corresponsabilidad en la vigilancia del territorio y la apropiación de la tecnología.

Finalmente, el desarrollo del sistema en un entorno virtual controlado permite validar el modelo, establecer su nivel de madurez tecnológica (TRL) y ofrecer una base sólida para futuras implementaciones físicas. La solución, por tanto, no solo es técnicamente viable, sino también contextualmente apropiada y socialmente pertinente para contribuir a la conservación de los ecosistemas estratégicos de Cali y a la gestión preventiva del riesgo de incendios forestales.

7.1 Descripción general del sistema propuesto

El presente proyecto propone una solución tecnológica basada en el Internet de las Cosas (IoT) para la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali. La arquitectura del sistema integra múltiples componentes: sensores físicos simulados, un sistema de comunicación

basado en MQTT, una visualización web de los datos recolectados y procesados, y un modelo predictivo alimentado con datos históricos y meteorológicos para anticipar condiciones de riesgo.

Además del enfoque tecnológico, la propuesta incorpora un componente de gobernanza ambiental mediante la participación ciudadana, buscando involucrar activamente a comunidades locales, autoridades y actores clave en la gestión de riesgos y protección del territorio. El sistema no solo permite la detección y notificación de eventos críticos en tiempo real, sino que también contribuye a la construcción de capacidades comunitarias a través del acceso a la información, la transparencia de los datos y la corresponsabilidad en la vigilancia del entorno.

Sistema simulado (prototipo virtual)

El sistema fue desarrollado en un entorno simulado con el objetivo de validar la arquitectura técnica y la integración de sus componentes sin requerir una implementación física inmediata. Para ello, se utilizó Wokwi como plataforma de simulación de hardware, donde se configuraron nodos virtuales con sensores de temperatura (DHT11), gas (MQ-2) y detección de flama. Los datos recolectados por estos sensores son transmitidos a través del protocolo MQTT, utilizando el broker público de Mosquitto, y estructurados en formato JSON mediante la librería ArduinoJson.

La lógica de alertas incluye umbrales de temperatura y concentración de gases para detectar condiciones críticas. Los datos son publicados en tiempo real y, en una implementación completa, serían consumidos por una aplicación web desarrollada en React y alojada en GitHub Pages, diseñada específicamente para este sistema. Esta plataforma incluye vistas diferenciadas para actores comunitarios, académicos y autoridades locales.

Además, se ha desarrollado un modelo predictivo de incendios basado en algoritmos de Machine Learning, entrenado con datos históricos del sistema FIRMS de la NASA y condiciones climáticas locales. Este modelo permite anticipar zonas de riesgo según las condiciones actuales o proyectadas.

Propuesta de implementación real

En su proyección de implementación física, el sistema estaría compuesto por nueve nodos de monitoreo, distribuidos estratégicamente en las zonas de mayor riesgo de incendio, previamente

identificadas por la CVC y la Fuerza Aérea Colombiana. Cada nodo integraría sensores ambientales, una unidad de procesamiento (ESP32), una fuente de energía solar y un módulo de comunicación LoRa o Wi-Fi, dependiendo de la cobertura en la zona.

Los datos serían enviados hacia una pasarela central, ubicada en una zona con conectividad estable, la cual a su vez enviaría la información a una base de datos en la nube (Firebase). Desde allí, los datos se visualizarían en tiempo real en la plataforma web y alimentarían continuamente el modelo predictivo. Las alertas se emitirían de forma automatizada, con notificaciones visuales y auditivas en la aplicación.

Cada nodo sería autónomo energéticamente, resistente al clima, de bajo costo y con capacidad de autodiagnóstico básico. La comunicación por LoRa permitiría cubrir zonas sin acceso a redes celulares o Wi-Fi, lo cual es particularmente importante en sectores como Terrón Colorado, Alto Menga o el corregimiento La Castilla.

7.2 Arquitectura técnica del sistema

La arquitectura del sistema propuesto para la detección temprana de incendios forestales se estructura en cinco capas funcionales que interactúan entre sí, desde la captura de datos en el entorno hasta la visualización e inteligencia predictiva. Este enfoque modular permite separar responsabilidades técnicas, facilitar el mantenimiento del sistema y posibilitar su escalabilidad futura.

A continuación, se presenta la ilustración de la arquitectura general del sistema, organizada por capas:

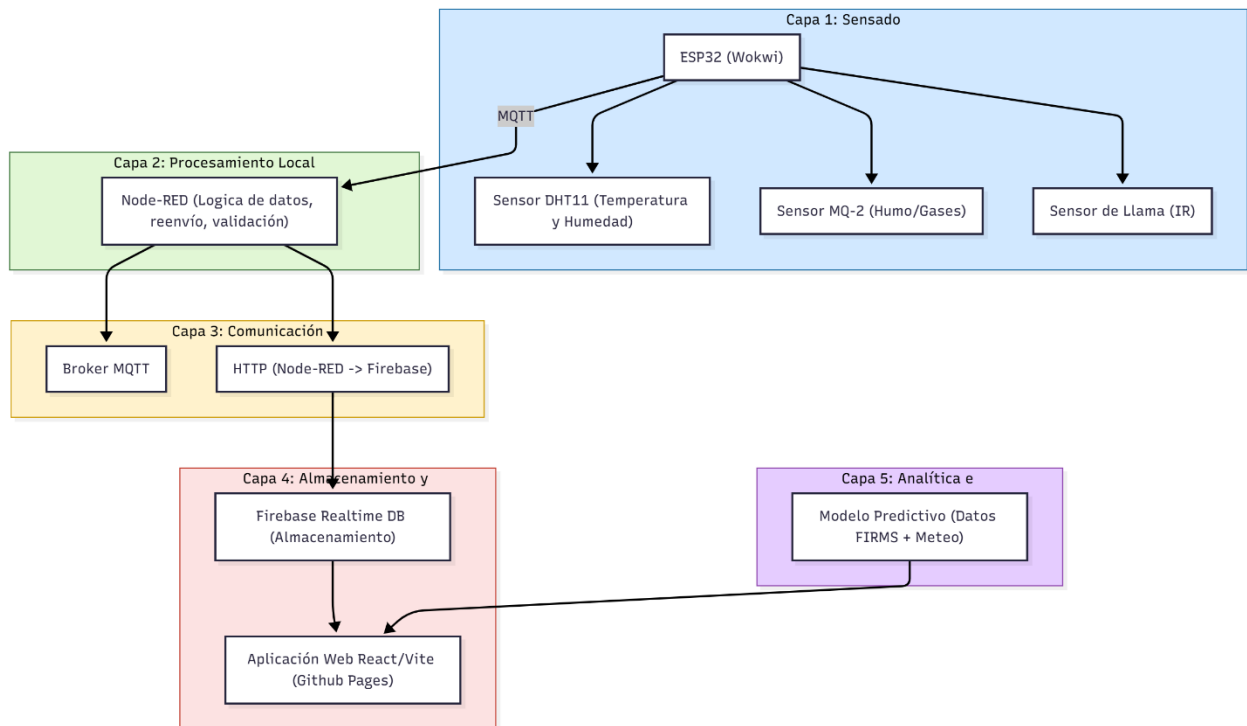


Ilustración 3 Arquitectura del sistema simulado

Cada una de las capas que conforman esta arquitectura cumple un rol específico dentro del flujo de información, tal como se describe a continuación:

Capa de Sensado (Edge): Simulación de nodos físicos en Wokwi

Esta capa representa la base del sistema, donde se originan los datos. En un escenario real, correspondería al conjunto de nodos desplegados físicamente en campo. En este proyecto, se ha implementado una simulación funcional en Wokwi, una plataforma que permite emular microcontroladores y sensores en un entorno virtual, facilitando la validación temprana sin requerir hardware físico.

Cada nodo simulado incluye los siguientes componentes:

- **ESP32:** Microcontrolador con conectividad WiFi, encargado de ejecutar el firmware que gestiona los sensores, evalúa condiciones críticas y transmite datos al sistema central.
- **DHT11:** Sensor de temperatura y humedad, utilizado para monitorear condiciones climáticas locales que inciden en el riesgo de incendio.

- **MQ-2:** Sensor de gases inflamables. Aunque su sensibilidad real es mayor para gases como propano o butano, en esta simulación se utiliza como proxy para detectar presencia de humo o gases de combustión.
- **Sensor de flama:** Dispositivo que identifica la presencia de llamas mediante luz infrarroja.

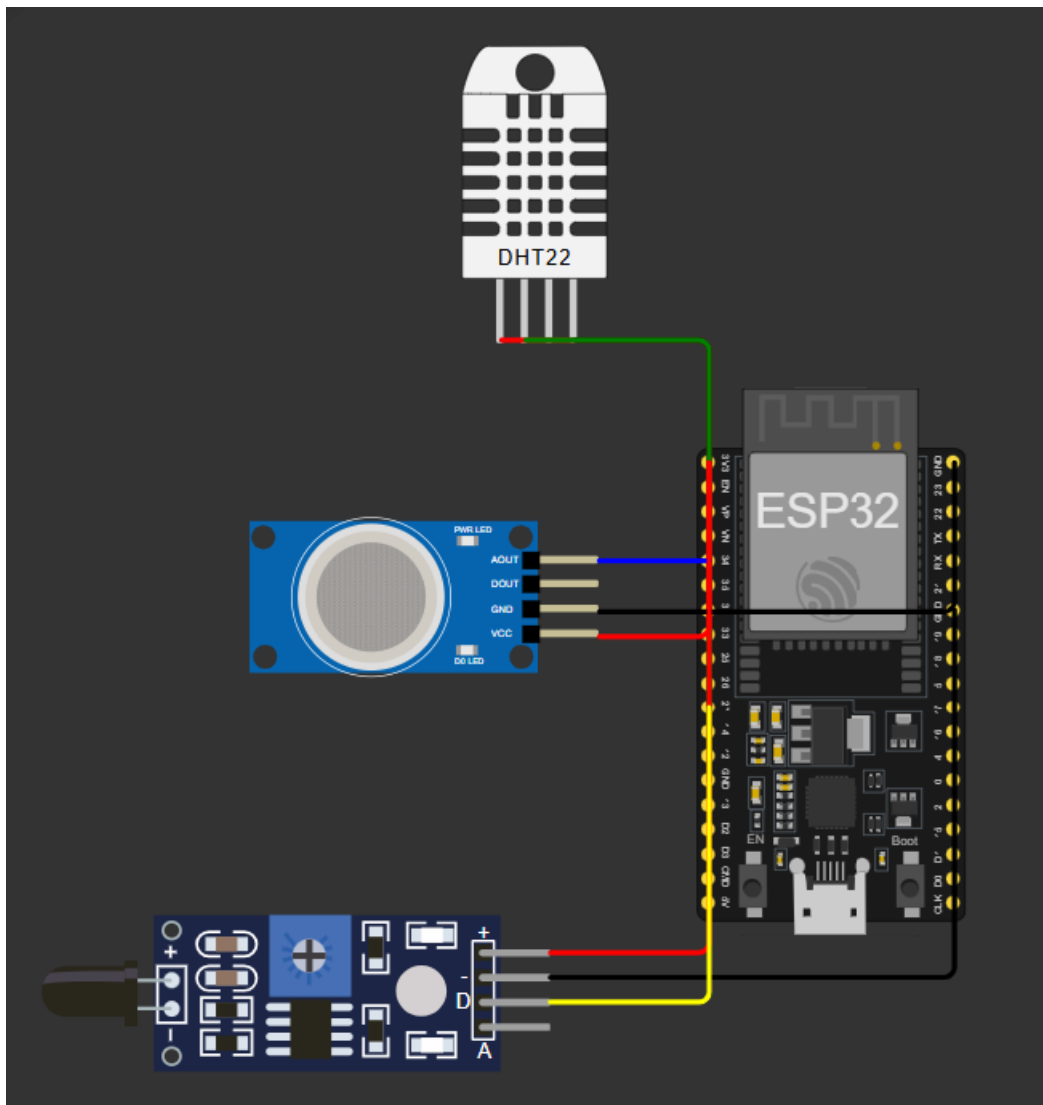


Ilustración 4 Simulación en Wokwi

El código en el ESP32 permite realizar lecturas periódicas, aplicar umbrales críticos y generar una estructura de datos JSON que incluye las variables recolectadas y banderas de alerta. Estas estructuras son enviadas a través de MQTT.

Capa de procesamiento local (Gateway virtual con Node-RED)

En sistemas IoT reales, los datos suelen pasar por una pasarela o "gateway" que realiza funciones de agregación, filtrado, transformación y reenvío de información. En esta arquitectura, dicho rol lo cumple Node-RED, una plataforma de programación visual basada en flujos.

Node-RED recibe los mensajes enviados por los nodos a través de MQTT. Dentro de este entorno se ejecutan las siguientes funciones:

- **Recepción y decodificación de datos:** Los mensajes JSON se interpretan y almacenan temporalmente.
- **Transformación y verificación:** Se aplican filtros para identificar valores anómalos, se normalizan unidades y se completan metadatos (como timestamp).
- **Enrutamiento inteligente:** Dependiendo del tipo de dato y la presencia de alertas, los mensajes se canalizan a diferentes servicios, por ejemplo, una base de datos o un canal de alertas.

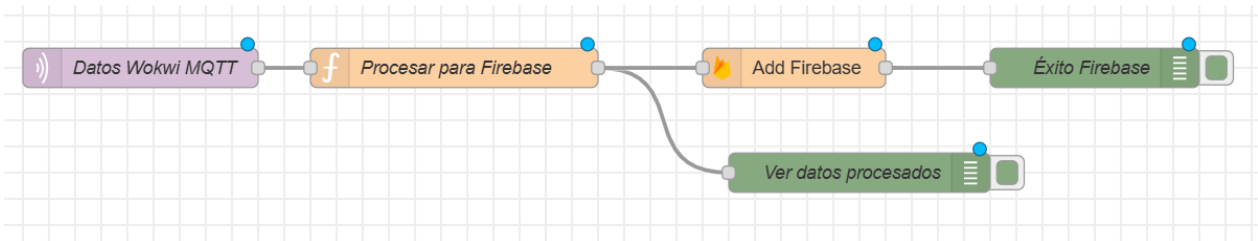


Ilustración 5 Flujo de Node-RED

Este componente actúa como intermediario entre los nodos físicos (simulados) y la nube, asegurando integridad y compatibilidad de los datos transmitidos.

Capa de comunicación (Protocolos IoT y conectividad en la nube)

El sistema emplea una combinación de protocolos de comunicación para garantizar eficiencia y compatibilidad:

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):** Usado entre los nodos y Node-RED. Es un protocolo ligero, ideal para redes de baja potencia o intermitentes, que opera sobre un modelo de publicación/suscripción.
- **HTTP REST:** Utilizado por Node-RED para enviar los datos procesados a la base de datos en la nube (Firebase). Esto permite una integración sencilla con servicios web modernos.
- **Firestore SDK:** Node-RED utiliza llamadas autenticadas para insertar o actualizar documentos en la base de datos de Firebase Realtime Database, permitiendo la persistencia y consulta eficiente desde aplicaciones web o móviles.

Esta capa asegura que la información fluya de forma segura y eficiente desde el borde (sensores) hasta la nube (almacenamiento y visualización).

Capa de almacenamiento y visualización (Firestore + Frontend web)

Los datos procesados se almacenan en Firestore Realtime Database, una base de datos NoSQL de Google que permite actualizaciones en tiempo real y sincronización con múltiples clientes.

Este backend se conecta con una aplicación web desarrollada en React + Vite (véase en el Anexo B), cuyo objetivo es ofrecer una interfaz intuitiva y segmentada para diferentes actores:

- **Panel comunitario:** Visualización sencilla de alertas activas, condiciones actuales y consejos de prevención.
- **Panel de autoridades:** Acceso a telemetría histórica, mapas de calor, alertas por nodo y trazabilidad de eventos.
- **Panel académico:** Acceso a series temporales completas, herramientas de análisis, exportación de datos e información del modelo predictivo.

Aunque la aplicación actualmente es un prototipo visual sin integración activa de datos, su arquitectura y diseño contemplan la conexión directa con Firestore para habilitar visualización en tiempo real.

Además del diseño conceptual, esta capa incluye la generación de registros funcionales reales en Firestore, evidenciados en la simulación del sistema. En Firestore Realtime Database los datos se

almacenan en una estructura jerárquica en formato JSON, organizada por nodos y marcas temporales. Cada entrada registra temperatura, humedad, gas, estado del dispositivo y umbrales de alerta, lo cual permite reconstruir el flujo de datos desde la captura hasta su visualización. La ilustración 6 presenta un fragmento real de la base de datos obtenida durante la simulación, donde se observan los nodos activos, sus lecturas ambientales y las señales de alerta registradas en tiempo real.

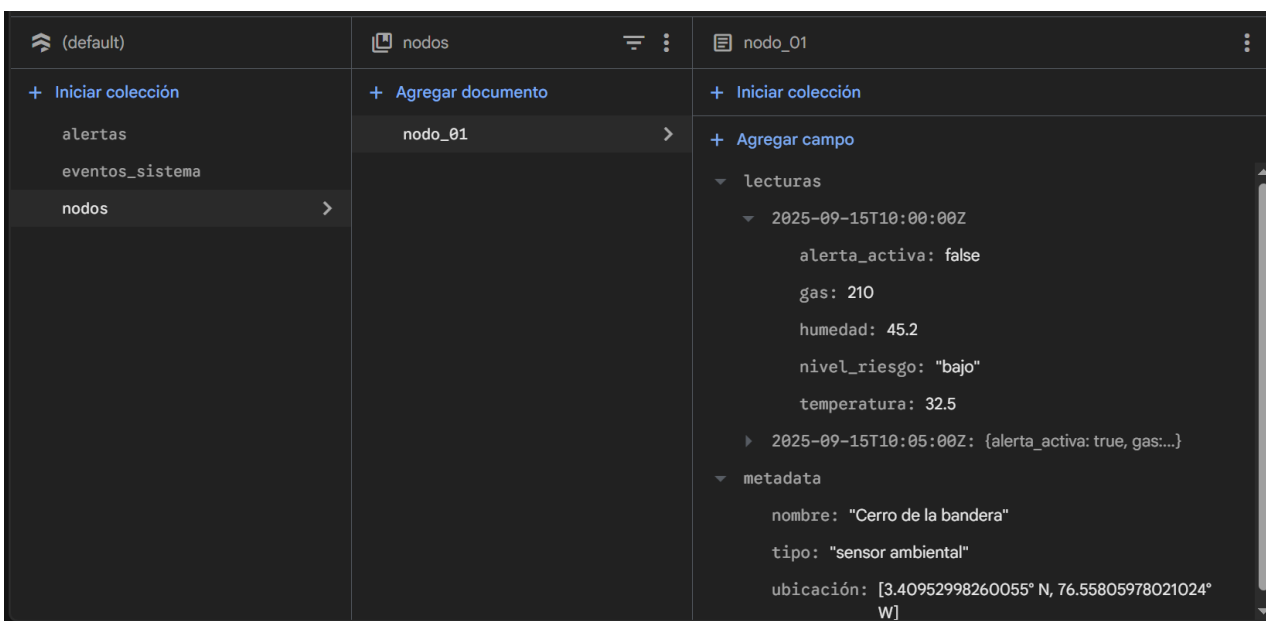


Ilustración 6 Base de datos

Estos registros validan la interoperabilidad entre Wokwi, Node-RED y Firebase, y constituyen un entregable fundamental para demostrar la coherencia técnica del sistema y su preparación para fases posteriores de despliegue físico.

La siguiente ilustración presenta la interfaz prototipo de la aplicación web diseñada para la visualización y monitoreo del sistema. En primer lugar, se muestra la pantalla de inicio de sesión, la cual permite autenticar usuarios según su rol (ciudadano, institucional o académico), habilitando vistas y funcionalidades diferenciadas. Una vez autenticado, el usuario es redirigido al panel principal, que incluye un mapa en vivo con la ubicación de los nodos IoT desplegados, cada uno identificado con un color que indica el nivel de riesgo actual (verde: bajo, amarillo: medio, rojo:

alto). A la derecha se visualizan los valores de temperatura, humedad, velocidad del viento y concentración de humo del nodo seleccionado, acompañados de indicadores de normalidad contextual. Más abajo, una gráfica muestra la evolución de temperatura y humedad durante el día, lo que permite observar tendencias en tiempo real. Finalmente, se presenta una lista de alertas recientes clasificadas por criticidad y zona, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas de manera oportuna.

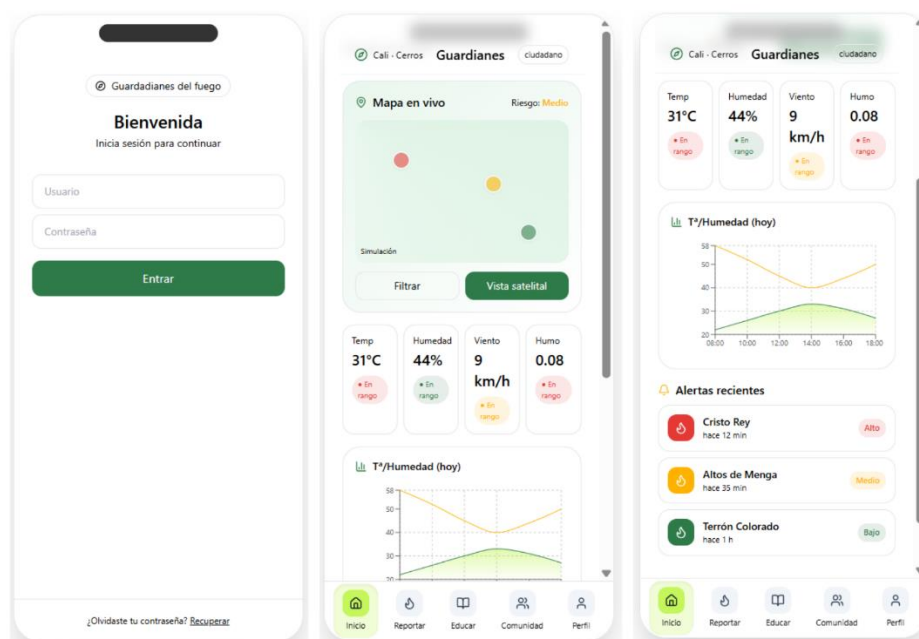


Ilustración 7 Pestañas: Login e Inicio

La siguiente imagen muestra tres funcionalidades clave del sistema orientadas a la participación ciudadana y la gestión colaborativa del riesgo. En primer lugar, se presenta la vista de “Reportar incendio”, donde los usuarios pueden registrar un evento en tiempo real indicando su ubicación (mediante GPS o seleccionándola manualmente en el mapa), subir evidencia fotográfica y redactar una descripción del incidente. Además, pueden marcar si desean que el reporte sea anónimo y asignar un nivel de prioridad estimado, facilitando la respuesta diferenciada por parte de las autoridades. En segundo lugar, la pestaña “Educar & prevenir” ofrece microcursos y contenidos didácticos sobre temas como prevención en caminatas, primeros auxilios básicos y pautas de actuación segura. Esta

sección busca fortalecer la educación ambiental y la preparación comunitaria frente a emergencias. Finalmente, la vista de “Comunidad” funciona como un espacio de interacción entre usuarios, permitiendo compartir recomendaciones, alertas o mensajes relacionados con el cuidado de los cerros y la respuesta ciudadana ante posibles incendios. Estas funcionalidades fortalecen la gobernanza ambiental, fomentan la corresponsabilidad social y amplían el alcance preventivo del sistema.

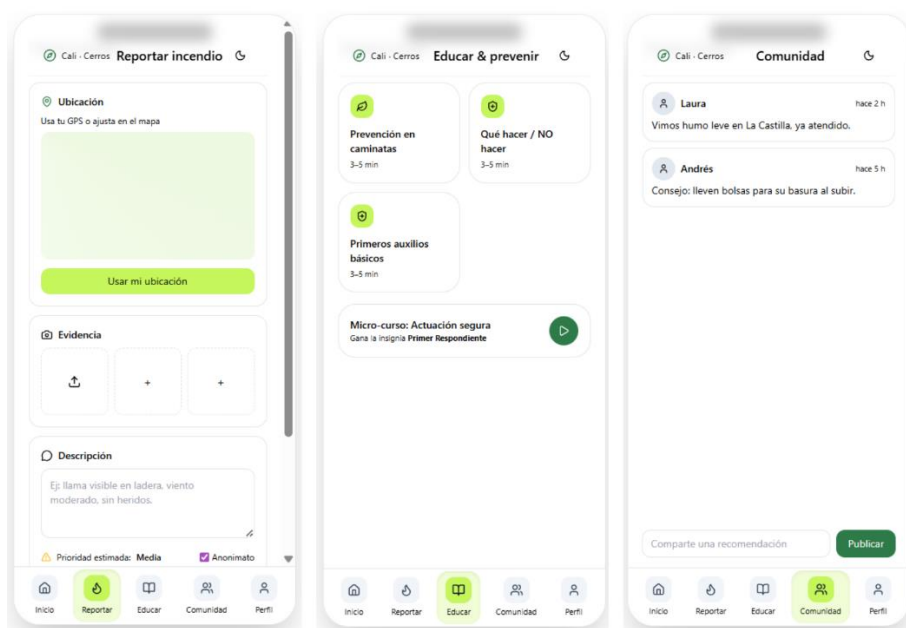


Ilustración 8 Pestañas: Reportar incendio, cursos y comunidad

La siguiente pantalla corresponde a la vista “Datos en tiempo real”, diseñada especialmente para usuarios del sector académico y científico. Esta funcionalidad permite consultar series históricas e indicadores ambientales registrados por los sensores del sistema. A través de un menú desplegable, el usuario puede seleccionar el sensor de interés, el tipo de variable (temperatura, humedad, etc.) y el rango de fechas deseado. Los datos pueden visualizarse gráficamente para observar su evolución a lo largo del día y, adicionalmente, se facilita el acceso a la URL de la API asociada o la descarga directa de los datos en formato CSV para análisis externo. Esta opción fortalece el componente investigativo del sistema, permitiendo a instituciones educativas y centros de investigación acceder a información estructurada, reutilizable y alineada con prácticas de ciencia abierta. Así, se busca no

solo mejorar la toma de decisiones, sino también fomentar el desarrollo de estudios complementarios sobre cambio climático, dinámica de incendios y comportamiento ambiental de los cerros de Cali.

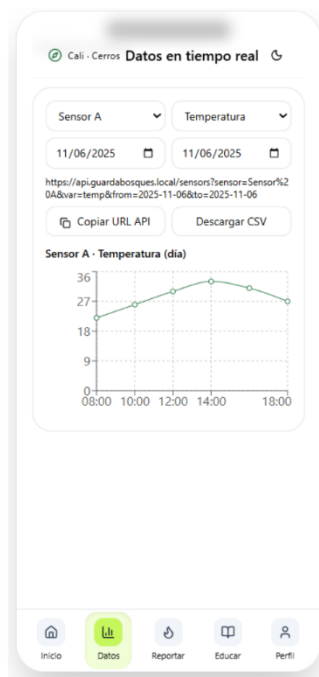


Ilustración 9 Pestaña: Datos históricos y en tiempo real

Las siguientes pantallas corresponden a las vistas exclusivas para cuerpos de bomberos y autoridades de respuesta. La primera es la pestaña de “Alertas”, la cual muestra un mapa en vivo con la ubicación de los nodos del sistema y su respectivo nivel de riesgo representado por colores (rojo, amarillo y verde). Debajo del mapa se despliega un listado de alertas recientes, clasificadas según su gravedad y tiempo de activación. La segunda pantalla corresponde al “Panel de despacho”, donde los reportes activos se agrupan según su estado: recibido, en ruta o controlado. Desde aquí, el operador puede ver los detalles de cada incidente, el tiempo desde su notificación y tomar decisiones como asignar brigadas de atención o marcar una alerta como controlada. Esta interfaz busca agilizar la toma de decisiones, mejorar la trazabilidad de la respuesta y optimizar la coordinación entre nodos del sistema y actores institucionales.

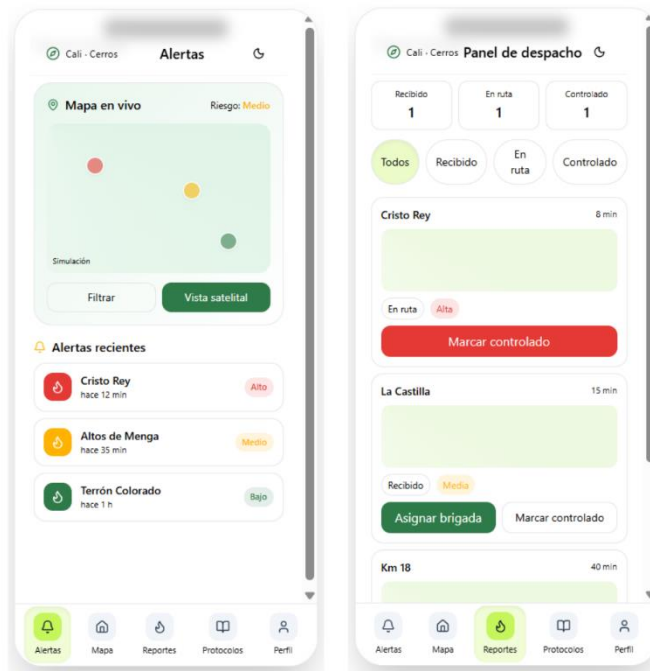


Ilustración 10 Pestañas: Alertas y reportes

Capa de analítica e inteligencia (Modelo predictivo de incendios)

La capa de analítica e inteligencia del sistema incorpora un modelo predictivo de riesgo de incendios forestales basado en técnicas de aprendizaje automático. Este modelo fue desarrollado con el objetivo de complementar la detección inmediata realizada por los sensores IoT, aportando una capacidad anticipatoria orientada a la prevención del riesgo.

El modelo se fundamenta en el algoritmo Random Forest, el cual combina múltiples árboles de decisión independientes para mejorar la robustez y precisión de las predicciones. En este caso, el modelo está compuesto por 100 árboles de decisión, cuyos resultados se agregan mediante votación mayoritaria y promedio de probabilidades, reduciendo el sobreajuste y aumentando la capacidad de generalización frente a escenarios ambientales variables.

Para su entrenamiento, se utilizaron datos históricos de focos de calor provenientes del sistema FIRMS de la NASA, junto con variables climáticas oficiales como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación, obtenidas de fuentes como IDEAM y Open-Meteo.

Adicionalmente, se incluyeron características ambientales y temporales que permiten capturar patrones asociados a la estacionalidad y a las condiciones propicias para la ocurrencia de incendios forestales.

El conjunto de datos fue particionado de forma temporal, empleando registros históricos para el entrenamiento del modelo y datos más recientes para su validación, con el fin de simular un escenario real de predicción futura. Como resultado, el modelo logró identificar correctamente aproximadamente el 85 % de los incendios reales, evidenciando un desempeño sólido en términos de capacidad predictiva.

Aunque este componente analítico aún no se encuentra integrado de manera directa con el flujo de sensores en tiempo real, su diseño permite una futura integración dentro de una arquitectura híbrida, que combine:

- Detección inmediata basada en sensores IoT.
- Predicción anticipada del riesgo a partir de datos históricos y meteorológicos.
- Generación de alertas inteligentes sustentadas en ambas fuentes de información.

De esta manera, la capa de analítica e inteligencia se concibe como una herramienta de apoyo a la planificación preventiva y la toma de decisiones, permitiendo anticipar escenarios críticos antes de que se materialicen eventos de incendio. El detalle completo del modelo, incluyendo parámetros, métricas de desempeño, estructura técnica y repositorio de implementación, se presenta en el Anexo C.

Estructura del Proyecto

```
Incendios/
├── FIRMS_CSVs/                                # Carpeta con CSVs históricos descargados de FIRMS
│   ├── modis_2000_Colombia.csv
│   ├── fire_archive_SV-C2_681505.csv
│   └── fire_nrt_J2V-C2_681504.csv
├── FIRMS_Colombia.csv                        # Dataset combinado de Colombia (1.7M registros)
├── FIRMS_Cali.csv                            # Dataset filtrado de Cali (473 eventos)
├── dataset_incendios_ml.csv                  # Dataset procesado para ML (492 registros)
├── incendios.py                              # Script inicial de descarga y visualización
├── construir_dataset_ml.py                   # Script de construcción del dataset ML
├── entrenar_modelo.py                       # Script de entrenamiento del modelo
├── predecir_con_sensores.py                 # Script de predicción con sensores
├── modelo_incendios.pkl                      # Modelo entrenado (generado)
├── modelo_metadata.pkl                      # Metadata del modelo (generado)
├── modelo_evaluacion.png                    # Gráficas de evaluación (generado)
├── requirements.txt                          # Dependencias Python
└── README.md                                # Este archivo
```

Ilustración 11 Estructura del sistema de predicción de incendios

La Ilustración 12 presenta el flujo completo de funcionamiento del modelo predictivo de incendios forestales. El proceso inicia con la entrada del conjunto de datos históricos, que incluye registros de incendios y variables climáticas relevantes. Estos datos son divididos temporalmente en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de validación, garantizando que el modelo aprenda patrones pasados y sea evaluado sobre escenarios futuros. Posteriormente, el algoritmo Random Forest genera múltiples árboles de decisión, cada uno entrenado con subconjuntos aleatorios de datos y variables, lo que incrementa la diversidad de los modelos individuales. Las predicciones de cada árbol se combinan mediante un proceso de agregación por votación, produciendo una estimación final del nivel de riesgo. El modelo entrenado es evaluado mediante métricas de desempeño y, una vez validado, puede ser utilizado en fase de inferencia para analizar nuevas condiciones ambientales, emitir una predicción de riesgo y apoyar la activación de alertas o acciones preventivas dentro del sistema propuesto.

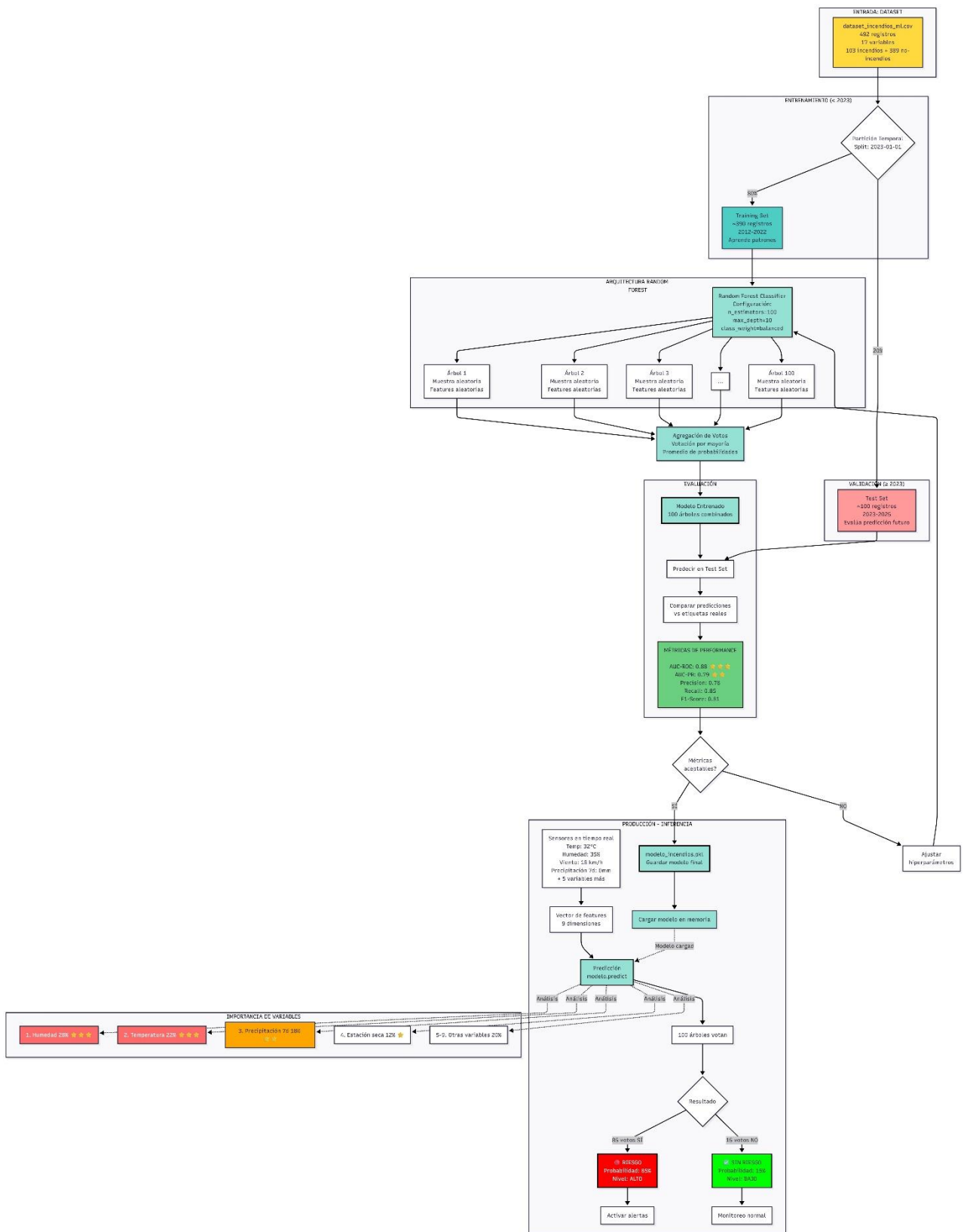


Ilustración 12 Flujo de funcionamiento del modelo predictivo

7.2.1 Justificación técnica de los componentes seleccionados

El sistema propuesto para la detección temprana de incendios forestales fue diseñado bajo una lógica de optimización de recursos, priorizando tecnologías de bajo costo, alta escalabilidad y facilidad de despliegue en contextos rurales o de difícil acceso. A continuación, se detallan los componentes clave según estos criterios:

Sensado - ESP32 + DHT11 + MQ-2 + Sensor de flama

Todos los sensores seleccionados son económicos y ampliamente disponibles en el mercado. El microcontrolador ESP32, que integra WiFi y Bluetooth, tiene un precio competitivo (~5-7 USD) comparado con otras placas como Arduino UNO + módulos de comunicación separados. El DHT11 y MQ-2, aunque de precisión básica, permiten captar condiciones de temperatura, humedad y presencia de gases con un margen de error tolerable para aplicaciones comunitarias.

El bajo costo permite la instalación de múltiples nodos en distintas ubicaciones. Además, el ESP32 puede ser programado y actualizado de forma remota, lo que facilita la extensión del sistema a nuevas zonas sin altos costos operativos.

Su tamaño compacto y bajo consumo energético lo hacen ideal para zonas rurales. Pueden alimentarse con baterías o paneles solares, lo que minimiza la infraestructura requerida.

Desde el punto de vista económico, el subsistema de sensado representa una solución altamente viable y eficiente. El costo total estimado por los componentes de sensado para 9 nodos asciende a \$810.611 COP, distribuidos entre microcontroladores ESP32 (\$251.685), sensores de temperatura y humedad DHT22 (\$258.111), sensores de humo y gas MQ-2 (\$108.000), sensores de calidad del aire MQ-135 (\$103.500) y sensores de flama IR (\$90.000). Esta inversión representa menos del 2% del presupuesto total del proyecto (~1.6%), lo cual es significativamente bajo para el impacto funcional que ofrece. La selección de estos sensores se justifica no solo por su bajo costo unitario, sino por su disponibilidad local, facilidad de reposición y capacidad para cubrir variables críticas para la detección temprana de incendios forestales. Además, su integración con ESP32 (con conectividad

WiFi/LoRa) permite el despliegue de una red de monitoreo efectiva y autónoma en áreas rurales sin infraestructura robusta.

Procesamiento local - Node-RED (interfaz de flujo)

Node-RED es una herramienta de código abierto que no requiere licencias, y puede ejecutarse en equipos de bajo rendimiento (e.g., Raspberry Pi, o incluso servicios gratuitos en la nube como Glitch o Railway para pruebas).

Node-RED permite la creación de flujos modulares que pueden escalarse fácilmente mediante la adición de nodos o la integración de nuevas APIs sin necesidad de reescribir el sistema completo. Su entorno visual basado en navegador permite crear y mantener flujos de datos sin necesidad de conocimientos avanzados en programación, ideal para comunidades o equipos con recursos limitados.

Node-RED ha sido seleccionado como plataforma principal para el procesamiento local y orquestación de datos por ser completamente gratuita y de código abierto. No requiere licencias ni pagos por uso, y puede ejecutarse en servidores gratuitos en la nube o dispositivos locales de bajo consumo. En el presupuesto se asigna \$720.000 COP para cubrir servicios de hosting en la nube por un año, lo que representa apenas un 1.7% del presupuesto total. Esta inversión moderada permite asegurar la disponibilidad de la plataforma 24/7 y escalar en caso de aumento de nodos o tráfico de datos. La interfaz visual y modular de Node-RED permite que incluso actores comunitarios con formación básica puedan gestionar o modificar flujos sin requerir conocimientos avanzados en programación, aumentando así la sostenibilidad social del sistema.

Comunicación - MQTT + HTTP + Firebase

MQTT es un protocolo liviano y gratuito que reduce significativamente el uso de ancho de banda, ideal para conexiones intermitentes o limitadas. Firebase (en su plan gratuito) permite almacenar y consultar datos en tiempo real sin coste, siempre que se mantenga dentro de los límites de uso.

Firestore escala automáticamente según la demanda. Además, MQTT puede adaptarse a cientos de nodos sin que el rendimiento del sistema se degrade significativamente.

Las librerías para ESP32 ya incluyen soporte para MQTT y Firestore, lo que facilita su integración. Además, Firestore permite la conexión directa con aplicaciones web sin necesidad de desarrollar backend personalizado.

El sistema de comunicación está diseñado para ser robusto, flexible y económico. Los módulos LoRa SX1278 ($9 \times \$12.688$) suman \$114.192 COP (0.3% del presupuesto), permitiendo enlaces de largo alcance con bajo consumo energético, ideales para contextos rurales. A esto se suma el uso de protocolos gratuitos como MQTT y HTTP, y la integración con Firestore en su modalidad gratuita, lo que evita costos por backend personalizado o infraestructura dedicada. El presupuesto general incluye también el dominio web (\$60.000) como gasto único anual. En conjunto, esta capa de comunicación ofrece una relación costo-beneficio muy favorable, permitiendo conectar múltiples nodos con confiabilidad y sin incurrir en pagos recurrentes elevados.

Almacenamiento y Visualización - Firestore + Web app (React/Vite)

React y Vite son tecnologías de desarrollo frontend gratuitas y ampliamente soportadas. El hosting en GitHub Pages no tiene coste, y Firestore ofrece capacidades de autenticación, base de datos y hosting gratuito en su versión básica.

La arquitectura modular del frontend y la naturaleza reactiva de Firestore permiten añadir nuevas funcionalidades o dashboards con facilidad. Se pueden incorporar múltiples roles de usuario y niveles de acceso.

Una vez compilada, la aplicación puede ser desplegada con un solo comando en GitHub Pages o Vercel. El usuario final solo necesita un navegador moderno para acceder.

La visualización de datos se logra mediante una aplicación web desarrollada con React y Vite, tecnologías modernas y gratuitas que reducen al máximo el costo de desarrollo. El despliegue se realiza en plataformas sin costo como GitHub Pages o Vercel. El presupuesto asigna \$720.000 COP

para servicios en la nube (Firebase incluido) y \$60.000 COP para el dominio web, lo que representa apenas ~1.8% del total del proyecto. Esta estrategia permite ofrecer visualizaciones en tiempo real, segmentadas por tipo de usuario, sin incurrir en costos adicionales por bases de datos, autenticación o almacenamiento. La solución es escalable y puede extenderse fácilmente a nuevos roles o funcionalidades sin impactar el presupuesto significativamente.

Inteligencia Artificial - Modelo predictivo con datos FIRMS

El modelo fue entrenado utilizando datos públicos de FIRMS (NASA), sin costes de adquisición. Puede ejecutarse en notebooks de Google Colab o servicios gratuitos de procesamiento.

El modelo puede actualizarse con nuevos datos a medida que se generen, permitiendo su mejora continua sin necesidad de reestructurar el sistema.

Puede integrarse como un servicio adicional a la app web o ser consultado a través de APIs REST desde Node-RED u otros entornos, permitiendo su uso incluso sin infraestructura de IA local.

El componente de inteligencia artificial, que incluye un modelo predictivo entrenado con datos de FIRMS, IDEAM y Open-Meteo, representa una solución económicamente eficiente. Su desarrollo se realizó con herramientas gratuitas como Google Colab, y no requiere licencias comerciales. En el presupuesto se incorpora dentro del rubro de “equipo técnico”, sin representar un gasto aislado. Esta elección estratégica permite incorporar analítica avanzada sin aumentar los costos del sistema, y su diseño modular permite integrarlo en fases posteriores a través de APIs, sin necesidad de infraestructura adicional costosa.

7.3 Enfoque Participativo: Gobernanza Comunitaria y Gestión Colaborativa del Riesgo

El enfoque participativo es un eje fundamental del presente proyecto, concebido no solo como una solución tecnológica para la detección temprana de incendios forestales, sino como una estrategia para fortalecer la gobernanza ambiental y la participación ciudadana en la gestión del riesgo. La crisis climática, el aumento en la frecuencia de incendios y las limitaciones institucionales en la vigilancia y respuesta oportuna, han puesto de manifiesto la necesidad de modelos de innovación que integren a las comunidades como actores activos en el cuidado del territorio.

Desde esta perspectiva, la propuesta reconoce que la tecnología, por sí sola, no garantiza soluciones sostenibles si no se articula con procesos sociales que promuevan la apropiación del conocimiento, la corresponsabilidad en la protección de los ecosistemas y el diálogo entre saberes locales y técnicos. En este sentido, el sistema IoT y la plataforma web han sido diseñados con funcionalidades que permiten facilitar el involucramiento de actores comunitarios en la detección, monitoreo y prevención de incendios, entendiendo que su experiencia cotidiana en el territorio es un recurso clave para la eficacia del sistema.

Gobernanza del riesgo y empoderamiento ciudadano

El proyecto se alinea con las recomendaciones de organismos como UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres), que enfatizan el enfoque de gobernanza multinivel y la inclusión de comunidades en la planificación y respuesta ante desastres. A nivel nacional, la Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política de gestión del riesgo de desastres en Colombia, establece que la participación ciudadana es un componente esencial en todas las fases del riesgo: conocimiento, reducción y manejo. Este marco normativo respalda la necesidad de generar herramientas tecnológicas que no solo informen, sino que también habiliten canales de participación activa, como lo propone esta solución.

Componentes participativos del sistema

El diseño del sistema contempla una serie de funcionalidades orientadas a la participación comunitaria:

- **Módulo ciudadano en la plataforma web**, donde los usuarios pueden reportar eventos sospechosos, acceder a mapas de riesgo en tiempo real y recibir recomendaciones de seguridad adaptadas a su localización.
- **Capacitación y apropiación tecnológica**, propuesta a través de contenidos educativos interactivos y estrategias de gamificación, que incentiven la participación lúdica e informada de las comunidades, especialmente de jóvenes y líderes ambientales locales.
- **Transparencia y acceso a la información**, mediante un sistema abierto de visualización de datos que democratiza el acceso a la información sobre alertas, condiciones meteorológicas y niveles de riesgo, fortaleciendo así el control social y la vigilancia ciudadana del territorio.

- **Retroalimentación a autoridades**, a través de un canal automatizado de alertas que integra tanto las lecturas del sistema como los reportes de la comunidad, para ser remitidos a entidades como el Cuerpo de Bomberos de Cali, el DAGMA y la CVC, mejorando así la coordinación institucional con los actores locales.

Impacto social y ambiental

Este modelo participativo busca generar un cambio de paradigma en la gestión de los cerros de Santiago de Cali, al pasar de un enfoque exclusivamente reactivo y centralizado, a uno proactivo, distribuido y colaborativo. Se espera que, mediante la inclusión de la ciudadanía en los procesos de monitoreo, se promueva un sentido de pertenencia y cuidado hacia estos ecosistemas estratégicos, considerados no solo pulmones verdes de la ciudad, sino también fuentes de biodiversidad, regulación climática y servicios ecosistémicos esenciales.

Adicionalmente, la articulación entre tecnología y comunidad potencia la sostenibilidad del sistema en el tiempo, ya que su mantenimiento y mejora no dependerá únicamente de instituciones públicas, sino también de una red social activa e informada. Esta visión integradora contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los ODS 13 (Acción por el clima), 15 (Vida de ecosistemas terrestres) y 16 (Paz, justicia e instituciones sólidas).

Estructura de Sostenibilidad y Roles de Gobernanza del Sistema

Para asegurar la sostenibilidad técnica, social e institucional del sistema propuesto, se requiere la participación articulada de distintos actores que asuman responsabilidades claras en su operación, mantenimiento y apropiación comunitaria. La siguiente tabla presenta los roles clave identificados, sus responsabilidades y la frecuencia estimada de sus intervenciones, con el fin de establecer una gobernanza distribuida que permita la continuidad del sistema en el tiempo y su adaptación a nuevas condiciones o territorios.

Actor o Rol	Responsabilidad principal	Periodicidad / Observaciones
Líder comunitario ambiental	Promover la apropiación del sistema en su comunidad, gestionar reportes y fomentar el cuidado del entorno.	Permanente – figura clave en la gobernanza local y la educación ambiental.

Gestor comunitario del sistema	Coordinar capacitaciones, apoyo técnico básico y recopilación de retroalimentación local.	Mensual – articulador entre comunidad y equipo técnico.
Equipo técnico IoT	Realizar mantenimiento, actualizaciones y resolución de fallos en nodos físicos o simulados.	Trimestral o bajo demanda – clave en la sostenibilidad operativa.
Desarrollador web/app	Mantener la plataforma actualizada, funcional y accesible para todos los tipos de usuario.	Bimensual – responsable de garantizar interfaz usable y escalabilidad técnica.
Cuerpo de Bomberos de Cali	Recibir alertas y reportes del sistema, coordinar respuesta rápida ante eventos.	En tiempo real – usuarios estratégicos del sistema de monitoreo.
DAGMA / CVC	Integrar la plataforma como insumo para planificación ambiental y gestión del riesgo territorial.	Bimensual – usuarios institucionales y validadores de políticas públicas.
Educadores ambientales	Usar la plataforma educativa para sensibilizar a jóvenes y escolares sobre incendios y protección ecológica.	Semestral – clave para sostenibilidad social y cultural del sistema.
Administrador de base de datos	Supervisar el funcionamiento y escalabilidad de Firebase, gestionar backups y permisos de acceso.	Mensual – figura técnica que garantiza continuidad de la información.
Analista de datos/IA	Monitorear la precisión del modelo predictivo, entrenar con nuevos datos y ajustar parámetros.	Trimestral – mejora continua de la capacidad predictiva del sistema.
Organización de apoyo externo	Brindar soporte financiero o institucional para la expansión, réplica o mantenimiento del sistema.	Eventual – puede incluir ONGs, universidades o cooperantes internacionales.

Tabla 4 Matriz de Responsabilidades para la Gestión del Sistema IoT

7.4 Viabilidad y Escalabilidad del Sistema Propuesto

La solución planteada para la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali demuestra una alta viabilidad técnica y un claro potencial de escalabilidad territorial y funcional. Esta sección expone los fundamentos que permiten afirmar la factibilidad de su desarrollo en entorno simulado, así como las condiciones que facilitarían su implementación en escenarios reales y su posterior expansión a otros territorios vulnerables.

Viabilidad técnica de la solución

Uno de los principales factores que sustentan la viabilidad del proyecto es el uso de un entorno de simulación virtual mediante la plataforma Wokwi, la cual permite emular el comportamiento de microcontroladores (ESP32) y sensores (DHT11, MQ-2, sensor de flama) de forma precisa y replicable, sin necesidad de disponer inicialmente de los dispositivos físicos. Esta simulación facilita la validación de la lógica de captura de datos, el procesamiento local de señales y el envío de información a servicios en la nube, permitiendo un entorno controlado para la iteración y mejora del sistema.

Además, el proyecto emplea tecnologías de bajo costo, ampliamente disponibles y de código abierto, como Node-RED para el procesamiento de datos y orquestación de flujos, Firebase para el almacenamiento en tiempo real y la conexión con una aplicación web desarrollada en React con Vite, lo cual reduce significativamente las barreras de entrada en términos de licencias, requerimientos de hardware especializado o dependencias de proveedores cerrados. Estas decisiones tecnológicas también promueven la modularidad, es decir, la posibilidad de adaptar o reemplazar componentes específicos sin afectar el sistema en su conjunto, aumentando así su mantenibilidad y vida útil.

La incorporación de un modelo de machine learning predictivo, entrenado con datos históricos de FIRMS (NASA) y variables meteorológicas de libre acceso, permite integrar capacidades de inteligencia computacional sin depender de costosos sistemas propietarios. Este enfoque favorece la replicabilidad en otros contextos con condiciones climáticas y ecosistémicas similares.

Con el fin de complementar este análisis y evidenciar de manera estructurada el nivel de factibilidad técnica del sistema propuesto, se elaboró una matriz de evaluación de viabilidad técnica, en la cual se analizan criterios clave como modularidad, interoperabilidad, escalabilidad, mantenibilidad, eficiencia operativa y pertinencia contextual. Esta matriz contrasta cada criterio con los componentes desarrollados en el entorno simulado y permite identificar tanto los aspectos fortalecidos en el prototipo como aquellos que requerirían validación adicional durante una futura implementación física. A continuación, se presenta la matriz correspondiente.

Criterio evaluado	Descripción del criterio	Evaluación del sistema (simulación)	Implicaciones para implementación futura
Modularidad	Capacidad del sistema para separar y reemplazar componentes sin afectar el funcionamiento general.	Alta: sensores, procesamiento, comunicación y almacenamiento están desacoplados y definidos por capas.	Facilita mantenimiento, futuras expansiones y reemplazo de nodos o tecnologías.
Interoperabilidad	Capacidad de los módulos para comunicarse entre sí utilizando protocolos estándar.	Alta: comunicación validada mediante MQTT/HTTP entre Wokwi, Node-RED y Firebase.	Posibilita integrar nuevos sensores, dashboards o APIs externas.
Escalabilidad	Posibilidad de ampliar el número de nodos, zonas monitoreadas o funcionalidades del sistema.	Alta en simulación: la arquitectura soporta múltiples nodos organizados por jerarquías en Firebase.	Requerirá pruebas de carga reales y definición de infraestructura energética en campo.
Mantenibilidad	Facilidad de actualizar componentes, depurar	Alta: flujos en Node-RED y estructura en Firebase permiten	Se deben definir protocolos de mantenimiento

	fallas o reconfigurar parámetros.	ajustes rápidos y trazabilidad clara del sistema.	comunitario o institucional.
Eficiencia operativa	Rendimiento del sistema en términos de transmisión de datos, latencia y estabilidad de comunicación.	Medio-alto: la simulación demuestra estabilidad; la eficiencia dependerá en campo de la calidad de conectividad.	Requiere pruebas reales en zonas con baja señal y evaluación de alternativas (LoRaWAN, WiFi mesh, solar).
Pertinencia contextual	Adecuación del sistema a las condiciones geográficas, climáticas y sociales del territorio.	Alta: sensores, topología lógica y modelo predictivo se ajustan a las características de los cerros de Cali.	Requiere co-validación con comunidad y entidades territoriales para adaptación final.
Replicabilidad	Capacidad de implementar el sistema en otros territorios con condiciones similares.	Alta: se utilizan tecnologías abiertas y de bajo costo con datos públicos y modelos reproducibles.	Solo requiere adaptación a fuentes de energía y disponibilidad de conectividad local.

Tabla 5 Matriz de evaluación de viabilidad técnica

Potencial de implementación física futura

Aunque la presente versión del sistema se basa en simulaciones, su diseño ha sido concebido con miras a una eventual implementación física en territorio. Todos los componentes seleccionados cuentan con equivalentes físicos accesibles en el mercado local (ESP32, sensores ambientales, fuentes de alimentación solar), y el software desarrollado es totalmente compatible con microcontroladores reales. De hecho, la arquitectura modular y distribuida facilita la transición progresiva de entornos simulados a pruebas piloto físicas, comenzando con uno o dos nodos

prototipo instalados en puntos estratégicos de los cerros, que posteriormente pueden escalarse según disponibilidad de recursos.

La integración con plataformas en la nube y la estandarización de protocolos de comunicación como MQTT y HTTP, garantiza que los datos capturados por nodos físicos puedan ser incorporados sin necesidad de rediseñar el sistema. Asimismo, el uso de Firebase y React en la interfaz web permite visualizar datos en tiempo real desde cualquier ubicación, lo que facilita la operación remota y el monitoreo continuo por parte de autoridades o actores comunitarios.

Estrategias de escalabilidad territorial y funcional

El sistema ha sido concebido desde su fase de diseño con un enfoque escalable. Las estrategias para lograr dicha escalabilidad contemplan las siguientes dimensiones:

- **Escalabilidad técnica:** gracias a la arquitectura basada en nodos independientes, es posible aumentar el número de unidades de sensado sin saturar el sistema, solo requiriendo ajustes menores en el flujo de datos y la capacidad de almacenamiento.
- **Escalabilidad geográfica:** una vez validado en los cerros de Santiago de Cali, el modelo puede ser replicado en otras zonas de riesgo, tanto urbanas como rurales, a nivel departamental o nacional. Para ello, se pueden reutilizar tanto los algoritmos de análisis como las estructuras de datos y flujos de comunicación ya probadas.
- **Escalabilidad institucional:** el sistema puede integrarse en plataformas existentes de gestión del riesgo (por ejemplo, sistemas municipales de alertas tempranas), ampliando su impacto y articulación con planes de emergencia y contingencia.
- **Escalabilidad social:** mediante alianzas con redes de vigilancia comunitaria, organizaciones ambientales y universidades, es posible replicar el enfoque participativo que sustenta el sistema, promoviendo una red descentralizada de monitoreo ambiental basada en ciencia ciudadana.

Estas estrategias se alinean con marcos de política pública como la Ley 1523 de 2012 (gestión del riesgo de desastres) y el Conpes 3995 de 2020 (cambio climático), que promueven el uso de

tecnologías accesibles, participación ciudadana y fortalecimiento de capacidades locales como principios para una gestión ambiental sostenible.

7.5 Posibilidad de Implementación en Otros Contextos: Caso Bogotá

La adaptación del sistema de detección temprana de incendios forestales al contexto de Bogotá es factible pero exige consideraciones puntuales. Bogotá se ubica sobre la Sabana de Bogotá, a unos 2.640 m s. n. m., con un clima frío y húmedo (temperaturas promedio $\approx 14,5$ °C). Estas condiciones difieren de Cali (≈ 1.000 m, clima cálido) y afectan el comportamiento de los sensores ambientales. Por ejemplo, el sensor DHT11 (rango -20 a 60 °C, ± 2 °C) puede perder precisión en climas fríos, por lo que se recomienda utilizar alternativas de mejor rango y precisión como el DHT22 (-40 a 80 °C, $\pm 0,5$ °C) o sensores industriales tipo SHT31 [43]. Asimismo, la alta humedad de Bogotá sugiere calibraciones específicas para evitar lecturas erróneas. En resumen, el módulo de sensores debe reconfigurarse: ajustar parámetros de calibración o sustituir componentes (DHT22/SHT31 en lugar de DHT11) para leer correctamente temperatura y humedad en altura [43].

Además, la topografía de los Cerros Orientales de Bogotá es accidentada, por lo que los nodos remotos pueden requerir carcasas robustas y fuentes de energía renovable (paneles solares dimensionados para menor irradiación solar). La arquitectura abierta del sistema original (sensores de bajo costo, comunicación MQTT/HTTP, código abierto) sigue siendo útil y modular para Bogotá. Sin embargo, la configuración de red puede cambiar: gracias a la mejor cobertura de telecomunicaciones en la capital, los datos de los nodos podrían enviarse más fácilmente a la nube (Firebase u otro servidor institucional). Aun así, en zonas muy aisladas o con interferencia montañosa, conviene usar tecnologías de red de área amplia (LPWA) resistentes. Estudios señalan que *LoRa* (licenciamiento libre) ofrece excelente autonomía de batería y alcance, mientras que *NB-IoT* (en bandas celulares licenciadas) aporta mejor confiabilidad y calidad de servicio [44]. De este modo, se podrían combinar ambos: emplear *LoRa* para nodos muy alejados (bajo costo, gran cobertura) y *NB-IoT* donde haya señal celular disponible [44].

A nivel institucional y social, Bogotá cuenta con un marco organizado para la gestión de incendios forestales. La *Comisión Distrital para la Prevención y Mitigación de Incendios Forestales* (CDPMIF), liderada por IDIGER (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos), la Secretaría Distrital

de Ambiente y el Cuerpo Oficial de Bomberos, coordina campañas y acciones preventivas. Por ejemplo, se identificó que alrededor del 90% de los incendios en la ciudad tienen causas humanas, por lo que se enfatiza la educación comunitaria [45]. El Cuerpo de Bomberos de Bogotá, a través de su *Grupo Especializado en Incendios Forestales* (creado en 2007), realiza vigilancia activa en los cerros (detectando columnas de humo) y capacita a la población en mitigación de riesgos [46]. Para implementar el sistema en Bogotá habría que integrarlo con estos actores: las brigadas de bomberos podrían usar la información de los sensores como alerta temprana; IDIGER y la Secretaría promoverían su despliegue y sostenibilidad; y las redes ciudadanas (vigilantes locales, vecinos organizados) adoptarían buenas prácticas de reporte y prevención (por ejemplo, mantener limpios los senderos y reportar fuegos). De hecho, el plan local ya contempla la instalación de “vigías” en puntos estratégicos para detectar humo [45], por lo que los sensores automatizados complementarían esta labor. En suma, es clave articular el sistema con la gobernanza distrital: ensamblar equipos con el CDPMIF, entrenar voluntarios de las JAC o gremios ambientales, y difundir protocolos de actuación comunitaria.

Finalmente, la inteligencia predictiva requiere reentrenamiento con datos locales. El modelo de IA desarrollado para Cali utiliza históricas de incendios y clima validadas para la región. En Bogotá las condiciones (clima, vegetación, altitud) son distintas, por lo que el sistema debe reaprender con fuentes propias. Esto implica recopilar series de fuego locales (p. ej. datos satelitales de FIRMS/NASA) e información climática de IDEAM y estaciones de Bogotá. Un estudio reciente combinó datos MODIS (NASA Fire Atlas), parámetros topográficos, climáticos y de vegetación para entrenar modelos ML de incendios forestales [47]. Siguiendo esa línea, en Bogotá se usarían datos históricos IDEAM y reportes de incendios del Distrito para ajustar el modelo predictivo. Con información actualizada (precipitaciones, sequías, horas de sol), la IA podría aprender patrones locales de riesgo.

En conclusión, la solución es replicable en Bogotá siempre que se adapte a su contexto. Técnicamente, bastan ajustes en sensores (por clima/altitud) y posiblemente incorporar redes IoT de largo alcance (LoRa/NB-IoT) [43][44]. Institucionalmente, requeriría coordinación con IDIGER, Bomberos y comunidades locales (potenciando los programas ya existentes de vigilancia y educación ambiental [45][46]). Con un reentrenamiento del modelo predictivo con datos locales

(IDEAM, FIRMS, estaciones meteorológicas) [47], el sistema mantendría su eficacia. Esta flexibilidad confirma su viabilidad técnica y su potencial replicabilidad para la gestión de incendios en la capital y otras regiones andinas del país.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar una propuesta de solución basada en tecnologías IoT, analítica predictiva y visualización interactiva para apoyar la detección temprana de incendios forestales en los cerros de Santiago de Cali. Dado el alcance delimitado a nivel de simulación, diseño arquitectónico y prototipado conceptual, los resultados obtenidos corresponden a una validación de concepto en entorno virtual, con componentes clave desarrollados parcialmente e integrados de forma representativa.

8.1 Resultados

8.1.1 Prototipo técnico y arquitectura funcional

Como primer resultado, se diseñó una arquitectura técnica distribuida por capas, abarcando desde el sensado hasta el análisis inteligente de los datos. Esta arquitectura incluye: sensores simulados (temperatura, humedad, humo y flama) en la plataforma Wokwi con ESP32; transmisión mediante protocolo MQTT hacia un entorno intermedio de procesamiento en Node-RED; almacenamiento y visualización de los datos en Firebase y una aplicación web desarrollada en React y Vite; y finalmente, un modelo predictivo de riesgo de incendio basado en datos históricos satelitales (FIRMS/NASA) y meteorológicos.

A nivel de simulación, se logró implementar:

- Una réplica funcional del comportamiento de sensores en Wokwi con el código de adquisición de datos.
- Un flujo lógico en Node-RED para recibir y transformar datos.
- El diseño de una interfaz web estática que anticipa cómo se mostraría la información en tiempo real para distintos actores (comunidad, autoridades, academia).

- El entrenamiento previo de un modelo de aprendizaje automático para predicción de riesgo de incendios, listo para integrarse con entradas en tiempo real.

Si bien algunos elementos del sistema aún no están completamente integrados —como el envío automático de datos del simulador a la visualización o la conexión directa entre sensores simulados y el modelo predictivo— el trabajo permite demostrar la viabilidad lógica del sistema propuesto y su relevancia tecnológica para el contexto local.

8.2 Análisis y discusión

La validación del sistema IoT en un entorno simulado permitió comprender no solo la viabilidad técnica de la solución, sino también sus implicaciones en el contexto real de los cerros de Santiago de Cali. A partir de los resultados obtenidos, es posible identificar una serie de reflexiones críticas relacionadas con la pertinencia, el desempeño del prototipo, los desafíos de implementación y el papel sociotécnico que un sistema de estas características podría desempeñar en el territorio.

8.2.1 Coherencia entre la problemática y la solución tecnológica

Los resultados demuestran que la arquitectura diseñada responde de manera consistente a la problemática identificada: la ausencia de mecanismos automatizados de vigilancia y la alta exposición del territorio a incendios forestales. La integración de sensores, procesamiento distribuido vía Node-RED y almacenamiento en Firebase evidencia una solución adaptable a las condiciones geográficas y ambientales del sector, lo cual es relevante considerando la fragmentación de la conectividad, la complejidad de la topografía y la vulnerabilidad ecológica documentada por entidades como la CVC e IDEAM.

El carácter modular del sistema permite que la solución pueda escalarse en número de nodos y adaptarse a nuevas zonas de riesgo, algo clave para los cerros tutelares, donde las condiciones climáticas varían significativamente en distancias cortas.

8.2.2 Comparación con tendencias reportadas en la literatura

Los resultados coinciden ampliamente con los hallazgos de la revisión sistemática:

- El uso de sensores de bajo costo, microcontroladores ESP32 y protocolos MQTT se alinea con las prácticas predominantes en soluciones IoT para detección de incendios.

- La arquitectura por capas (sensado – gateway – nube – aplicación – inteligencia) replica los modelos que demuestran mayor escalabilidad y estabilidad en contextos rurales.
- La inclusión de un enfoque predictivo basado en machine learning responde a tendencias recientes que buscan complementar detecciones instantáneas con análisis de riesgo probabilístico.

Sin embargo, el proyecto aporta tres elementos diferenciadores que no suelen ser abordados de forma integrada en la literatura:

1. Un enfoque sociotécnico, que incorpora gobernanza comunitaria y educación ambiental como componentes del sistema.
2. Una visualización interactiva multi-actor, que permite segmentar la información para comunidad, autoridades y academia.
3. Una estrategia de implementación territorial, basada en validación en campo y participación de actores locales.

Esto posiciona el prototipo no solo como una solución técnica, sino como un modelo de gestión ambiental inteligente aplicable al contexto de ciudades latinoamericanas.

8.2.3 Evaluación del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)

El Technology Readiness Level (TRL) es una métrica internacionalmente aceptada para evaluar el grado de madurez de una tecnología, con niveles que van desde principios científicos básicos (TRL 1) hasta un sistema probado en condiciones reales (TRL 9) [48]. Originalmente desarrollada por la NASA, esta escala se ha estandarizado en nueve niveles que son ampliamente usados en investigación e industria [48]. Cada nivel describe etapas específicas de desarrollo; por ejemplo, el TRL 3 corresponde a la prueba de concepto realizada mediante estudios analíticos y experimentales en entornos de laboratorio o simulación, antes de integrar los componentes en un sistema completo [49].

Según esta escala, y dado el estado actual del sistema simulado, se determina que el proyecto alcanza un TRL 3 – Validación analítica del concepto en entorno controlado o de simulación. Esto se sustenta en:

- El diseño detallado de la arquitectura del sistema con componentes específicos, siguiendo una estructura modular y escalable.
- La validación conceptual mediante simuladores (e.g., Wokwi), flujos lógicos en Node-RED y esquemas de transmisión de datos en un entorno controlado de laboratorio virtual.
- La existencia de un modelo de predicción de riesgo entrenado con datos reales, aunque aún no integrado operativamente en la plataforma final.

Este nivel de madurez implica que se ha demostrado el principio de funcionamiento del sistema en condiciones no operativas, proporcionando evidencia técnica suficiente para proyectar desarrollos posteriores. En otras palabras, se ha logrado una prueba de concepto funcional de los componentes críticos en laboratorio, aunque el sistema completo no ha sido probado en condiciones de campo [49]. En trabajos futuros, la implementación física, la validación con hardware real y las pruebas en campo permitirán escalar el sistema hacia niveles TRL 5 y superiores, consolidando su madurez tecnológica.

Limitaciones y fortalezas del sistema en su estado TRL 3

Ubicar el prototipo en un TRL 3 permite reconocer que existe evidencia funcional del concepto, pero que el comportamiento real del sistema aún depende de múltiples variables externas. Desde esta perspectiva, el análisis muestra dos dimensiones relevantes:

Fortalezas observadas:

- La interoperabilidad entre Wokwi, Node-RED y Firebase confirma que la arquitectura es técnicamente coherente.
- La lógica de umbrales configurada en la simulación reproduce fielmente las condiciones de riesgo utilizadas en investigaciones previas.
- El modelo predictivo entrenado con datos FIRMS/NASA aporta valor agregado al ofrecer una dimensión anticipatoria que complementa la detección inmediata.

Limitaciones evidenciadas:

- La simulación no incorpora ruido ambiental real, interferencias electromagnéticas o variabilidad extrema de temperatura, por lo que la precisión sensorial en campo podría diferir.
- La falta de integración operativa entre el modelo predictivo y los datos del simulador muestra un reto clave para fases posteriores: la sincronización entre detección y predicción.
- La arquitectura depende parcialmente de conectividad estable hacia la nube, lo que en zonas rurales podría requerir estrategias híbridas de edge/fog computing para garantizar disponibilidad continua.

Estas limitaciones no invalidan el prototipo; por el contrario, orientan de manera precisa los siguientes niveles de madurez tecnológica.

8.2.4 Pertinencia sociotécnica y gobernanza del riesgo

Un aspecto fundamental que emerge del análisis es que la efectividad real del sistema no depende únicamente de su arquitectura tecnológica, sino de su articulación con procesos de gobernanza y participación comunitaria.

Los resultados muestran que la interfaz propuesta puede cumplir un rol más amplio que la simple visualización de datos:

- Funciona como mecanismo educativo, fortaleciendo la comprensión de riesgos.
- Actúa como herramienta de transparencia, al permitir que la comunidad acceda a información en tiempo real.
- Favorece la corresponsabilidad al integrar reportes ciudadanos y validar alertas por múltiples fuentes.

El sistema, en consecuencia, se interpreta como un artefacto sociotécnico, donde tecnología, territorio y comunidad interactúan para la prevención del riesgo. Esto es particularmente relevante en los cerros de Cali, donde el conocimiento local y la presencia comunitaria juegan un papel esencial en la detección temprana.

8.2.5 Alcance logrado y contribuciones

Entre los aportes clave de este trabajo se destacan:

- **Arquitectura IoT modular y escalable:** Se logró el diseño estructurado de una arquitectura IoT modular, adaptable y escalable, lo que facilita su adaptación a diversas configuraciones y necesidades con mínimos ajustes [50]. Esto sienta las bases para un sistema flexible que puede crecer en complejidad sin comprometer su funcionamiento.
- **Modelo predictivo contextualizado al territorio:** Se implementó un modelo de predicción de riesgo entrenado con datos locales, con potencial para integrarse a sistemas de alerta temprana. En la literatura, la incorporación de métodos de aprendizaje automático en plataformas IoT permite procesar datos en tiempo real y generar alertas preventivas de manera efectiva [51], lo que respalda el enfoque adoptado de desarrollar un modelo ajustado a las condiciones del territorio objetivo.
- **Interfaz web orientada a gobernanza y participación ciudadana:** Se propuso una interfaz web centrada en la gobernanza colaborativa y la participación ciudadana, integrando componentes de educación pública, monitoreo ambiental y colaboración comunitaria. Experiencias previas muestran que las plataformas de datos accesibles a la comunidad fomentan la transparencia y empoderan a los ciudadanos, fortaleciendo la confianza entre la población y las autoridades locales [52]. Esto respalda la idea de que involucrar a la ciudadanía mediante una interfaz interactiva puede mejorar la adopción y eficacia del sistema de alerta.
- **Validación en entorno simulado con herramientas accesibles:** Se articuló el uso de tecnologías de simulación accesibles junto con servicios reales en la nube (como Firebase para base de datos y GitHub Pages para alojamiento web). Esta estrategia permitió evaluar la factibilidad técnica sin recurrir a infraestructura costosa o de difícil acceso. En concordancia con buenas prácticas reportadas, el uso de simuladores reduce los costos y complejidad de las pruebas al evitar la necesidad de hardware físico en las etapas iniciales [53]. Además, los simuladores facilitan la creación de prototipos virtuales para validar funciones y flujos de datos del sistema en un entorno controlado antes de su despliegue real [53]. Esto demuestra la viabilidad técnica del concepto con herramientas de bajo costo, entregando evidencia funcional temprana de la solución propuesta.

A pesar de las limitaciones en la integración final de todos los componentes y la falta de pruebas físicas en campo, el trabajo entrega un cuerpo coherente de conocimiento, herramientas funcionales y evidencia conceptual que sustentan la posibilidad de una implementación futura del sistema. En conjunto, estos resultados representan un avance significativo, proporcionando una base sólida para que desarrollos posteriores lleven el prototipo desde el entorno de simulación hacia aplicaciones reales operativas, con el correspondiente aumento en el nivel de madurez tecnológica.

8.2.6 Propuesta metodológica para la implementación futura

Con el fin de avanzar hacia una implementación física del sistema propuesto, se plantea una estrategia metodológica que permita validar su funcionamiento en campo, incorporar la participación de actores clave y proyectar su escalabilidad territorial. Esta propuesta parte del estado actual del proyecto, clasificado en un TRL 3, y busca sentar las bases para una transición hacia fases superiores de madurez tecnológica mediante un despliegue controlado, participativo y evaluable.

En una primera etapa se sugiere realizar una fase piloto de implementación física, que consistirá en la instalación de un número reducido de nodos IoT en un sector representativo de los cerros de Cali. Esta zona debe presentar condiciones de riesgo conocidas, acceso logístico razonable y disponibilidad de conectividad. Los nodos estarán equipados con sensores de bajo costo (temperatura, humedad, flama) y conectividad WiFi o LoRa, según la cobertura del lugar. El objetivo de esta fase será validar que el flujo de información desde los sensores hasta la visualización web funciona correctamente con datos reales, manteniendo la arquitectura lógica diseñada en la simulación.

De forma paralela, se propone una estrategia de participación de actores locales, con el propósito de vincular comunidades, autoridades ambientales y centros académicos al proceso de validación. A través de reuniones participativas y talleres demostrativos, se buscará no solo socializar la solución, sino también recoger retroalimentación sobre la comprensión, utilidad y posibles mejoras del sistema. Asimismo, se contempla la capacitación básica de líderes comunitarios para el uso de la plataforma web y la interpretación de alertas, promoviendo así una apropiación colectiva del sistema como herramienta de prevención.

La fase piloto incluirá una validación técnica y contextual del sistema. Desde el punto de vista técnico, se evaluarán variables como la estabilidad de la comunicación, la precisión de las lecturas y la latencia del flujo de datos. Desde una perspectiva social, se analizará el grado de apropiación, la claridad de la interfaz y la utilidad percibida por los distintos actores. Para ello, se aplicarán instrumentos como encuestas breves, bitácoras de uso y sesiones de grupo focal. Esta validación permitirá no solo identificar posibles fallas operativas, sino también ajustar aspectos del diseño para mejorar su pertinencia en el entorno real.

Adicionalmente, se plantea un análisis de riesgos y estrategias de mitigación para anticipar desafíos durante la implementación. Entre los riesgos técnicos se identifican interrupciones en la conectividad, fallas de alimentación eléctrica o daño físico de los sensores, que podrían mitigarse mediante almacenamiento local temporal, uso de paneles solares o ubicación estratégica de los nodos. En el ámbito social, se reconocen posibles barreras de apropiación, resistencia al uso o uso indebido de la información, que requerirán acompañamiento pedagógico, acuerdos éticos y protocolos de gestión responsable de los datos.

Finalmente, se propone una estrategia de escalamiento progresivo, que permita transitar del TRL 3 actual a niveles superiores (TRL 5 o 6). Esto implicaría replicar el piloto en distintos puntos críticos de los cerros, integrar en tiempo real el modelo predictivo desarrollado y sincronizar el sistema con plataformas institucionales existentes. Esta ruta metodológica, basada en validación empírica, participación activa y evaluación estructurada, busca no solo demostrar la factibilidad operativa del sistema, sino también generar condiciones para su sostenibilidad y expansión a futuro.

9. PRESUPUESTO

Con el fin de estimar los recursos necesarios para el desarrollo del prototipo de detección temprana de incendios forestales mediante sensores IoT en los cerros de Santiago de Cali, se ha elaborado el siguiente presupuesto. Este contempla los costos asociados a los componentes de hardware, servicios de software, logística de implementación, pruebas en campo y contingencias. La selección de los elementos se ha orientado a garantizar un equilibrio entre funcionalidad, confiabilidad y viabilidad económica, priorizando el uso de tecnologías de bajo costo y soluciones energéticamente autónomas que permitan la escalabilidad del sistema en entornos de difícil acceso.

En la siguiente tabla se detallan los costos de los implementos necesarios para llevar a cabo el proyecto con 9 nodos. Los precios unitarios se han obtenido de fuentes reales en el mercado colombiano (COP):

Ítem	Costo (COP)	% del total aprox.
Hardware (9 nodos IoT)		~7%
– Microcontroladores ESP32 (9 × \\$27.965)	\\$251.685	0.5%
– Sensores temperatura/humedad DHT22 (9 × \\$28.679)	\\$258.111	0.5%
– Sensores humo/gas MQ-2 (9 × \\$12.000)	\\$108.000	0.2%
– Sensores gas aire MQ-135 (9 × \\$11.500)	\\$103.500	0.2%
– Sensores de flama IR (9 × \\$10.000 estimado)	\\$90.000	0.2%
– Módulos LoRa SX1278 433MHz (9 × \\$12.688)	\\$114.192	0.3%
– Baterías recargables Li-Ion 18650 (9 × \\$32.000)	\\$288.000	0.7%
– Paneles solares 5V 10W (9 × \\$55.000)	\\$495.000	1.2%
– Kits conexión (protoboard, cables) (9 × \\$20.000)	\\$180.000	0.4%
– Cajas impermeables IP65 (9 × \\$35.500)	\\$319.500	0.8%
Software/Servicios		~1%
– Hosting en nube (Firebase/Node-RED, 1 año)	\\$720.000 (aprox)	1.7%

– Dominio web (1 año)	\\$60.000	0.1%
– Licencias de software (open source)	\\$0	0%
Desarrollo y personal (6 meses)		~85%
– Equipo técnico (IoT y software)	\\$30.000.000	58%
– Gestor comunitario (social)	\\$18.000.000	35%
Transporte y logística		~1%
– Visitas de instalación y pruebas (5 viajes)	\\$400.000	0.9%
Otros		~3%
– Legalización/permisos	\\$500.000 (aprox)	1.2%
– Contingencias (~10%)	\\$5.000.000	9.7%
Total estimado inicial	\\$51.148.000	100%

Tabla 6 Presupuesto

10. RIESGOS

Aunque el presente trabajo de grado desarrolla un sistema de detección temprana de incendios forestales bajo un enfoque simulado, es fundamental anticipar los principales riesgos asociados a una eventual implementación física en el entorno real, particularmente en zonas ambientalmente vulnerables como los cerros de Santiago de Cali. La identificación de estos riesgos permite establecer estrategias de mitigación que faciliten futuras fases de despliegue y operación efectiva del sistema, contribuyendo a su sostenibilidad técnica, operativa y social.

A continuación, se detallan los riesgos más relevantes y las estrategias de mitigación propuestas:

Riesgo identificado	Descripción	Probabilidad	Responsable del control	Indicadores de seguimiento	Clasificación ISO 31000	Estrategia de mitigación
1. Dificultades de conectividad en zonas rurales o de difícil acceso	La cobertura limitada en zonas montañosas puede afectar la transmisión en tiempo real de los datos.	Alta	Equipo técnico del proyecto / Soporte IoT	Tasa de paquetes perdidos, latencia promedio, tiempo de reconexión de nodos.	Riesgo tecnológico-operativo	Implementar LoRa o redes mesh; evaluar gateways satelitales; instalar repetidores estratégicos.
2. Vulnerabilidad de los nodos a condiciones	Humedad, altas temperaturas, lluvia o fauna	Media	Equipo de infraestructura IoT / Mantenimiento	Número de fallas por nodo, variación de temperaturas	Riesgo físico-ambiental	Uso de carcacas IP65+, componentes

ambientales extremas	pueden deteriorar los dispositivos.			internas, registros de humedad.		industriales y mantenimientos preventivos.
3. Fallos en la autonomía energética de los nodos	Poca radiación solar o follaje denso puede reducir la carga de los paneles.	Media	Equipo técnico IoT / Especialista energético	Porcentaje de carga diaria, tiempo de autonomía, ciclos de carga/descarga.	Riesgo operativo-energético	Dimensionar paneles y baterías; modos de ahorro; redundancias energéticas.
4. Robo, vandalismo o sabotaje	Riesgo de daño o hurto de equipos instalados en zonas expuestas.	Media	Coordinación comunitaria / Equipo de campo / Autoridades locales	Número de incidentes reportados, activaciones de sensores anti-manipulación.	Riesgo social-operativo	Carcasas discretas, anclajes seguros, apropiación comunitaria e indicadores anti-manipulación.
5. Escalabilidad limitada por costos	La expansión del sistema puede	Media	Equipo de gestión del proyecto / Instituciones aliadas	Costo por nodo instalado, costo anual de	Riesgo financiero - organizacional	Componentes de bajo costo, despliegue modular,

	exigir inversiones elevadas.			mantenimiento, disponibilidad presupuestal.		alianzas institucionales.
6. Dificultades en gestión y análisis de grandes volúmenes de datos	Muchos nodos generan flujos de datos difíciles de administrar.	Media	Equipo de datos / Desarrolladores backend	Capacidad de almacenamiento, uso promedio de CPU/servidor, tiempos de consulta.	Riesgo tecnológico-informacional	Infraestructura en la nube, procesamiento local, filtrado inteligente de datos.
7. Rechazo o escasa apropiación comunitaria	La comunidad podría no confiar, comprender o usar el sistema.	Baja-Media	Equipo social del proyecto / Enlaces comunitarios	Participación en talleres, cantidad de usuarios activos, encuestas de percepción.	Riesgo social-comunitario	Educación ambiental, talleres participativos, retroalimentación continua y transparencia.
8. Incompatibilidad con plataformas institucionales existentes	Limitaciones técnicas pueden impedir integrar el	Media	Equipo técnico del proyecto / Instituciones (CVC,	Tiempo requerido para integrar API, fallas de interoperabil	Riesgo institucional-tecnológico	APIs estandarizadas, acompañamiento técnico y acuerdos

	sistema a plataforma s oficiales.		DAGMA, IDEAM)	idad, compatibilidad de formatos.		de interoperabilidad.
9. Incertidumbre en la sostenibilidad financiera	No asegurar recursos para operación y mantenimiento a largo plazo.	Alta	Dirección del proyecto / Entidades financiadoras	Disponibilidad anual de presupuesto, porcentaje de cofinanciación, costos recurrentes.	Riesgo financiero - estratégico	Modelos de sostenibilidad mixta, cooperación internacional, demostración de beneficios.
10. Cambios regulatorios o limitaciones normativas	Restricciones legales podrían afectar el uso de tecnologías o conectividad remota.	Baja	Equipo jurídico del proyecto / Entes reguladores	Número de trámites requeridos, cumplimiento normativo, cambios en resoluciones.	Riesgo legal-normativo	Mapeo regulatorio, diálogo temprano con reguladores y cumplimiento técnico-legal.

Tabla 7 Riesgos y estrategias de mitigación

La identificación y valoración de los riesgos asociados a la implementación del sistema IoT permite establecer un panorama integral de los desafíos técnicos, operativos, sociales, institucionales y normativos que podrían afectar su desempeño en entornos reales. En conjunto, los riesgos con mayor probabilidad —particularmente la limitada conectividad en zonas montañosas y la incertidumbre sobre la sostenibilidad financiera— evidencian la necesidad de adoptar estrategias sólidas de

infraestructura y de gestión a largo plazo, mientras que riesgos de naturaleza operativa, como la autonomía energética de los nodos o la manipulación no autorizada de los equipos, destacan la importancia de un diseño robusto y de la apropiación comunitaria. La asignación de responsables de control, así como la definición de indicadores de seguimiento, garantiza un marco claro para el monitoreo continuo del sistema y permite anticipar fallas o desviaciones relevantes durante su operación. Finalmente, la clasificación de los riesgos según los lineamientos de la norma ISO 31000 aporta un enfoque estructurado para su tratamiento, asegurando que las estrategias de mitigación propuestas se ajusten a estándares internacionales de gestión del riesgo. En conjunto, este análisis confirma que, aunque el sistema enfrenta desafíos significativos, estos pueden ser gestionados mediante una combinación de soluciones tecnológicas, articulación institucional y participación comunitaria, lo que fortalece la viabilidad futura del proyecto y su potencial de implementación en los cerros de Santiago de Cali.

REFERENCIAS

- [1] I. Iglesias Álvarez, “California recurre a la IA para detectar incendios forestales,” CIO.
- [2] M. McNabb, “Drone Technology Enhances Early Detection of Forest Fires,” Drone Life.
- [3] NASA, “ARSET - Introducción al Monitoreo y Gestión de Incendios Forestales Mediante Observaciones Satelitales y Herramientas de la NASA,” NASA.
- [4] Xprize, “Eyes in the Sky: The Power of Space-Based Wildfire Detection,” Xprize.
- [5] E. Tatayo Vinueza and R. Llugsi Cañar, “Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos para detección temprana de incendios forestales,” *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, vol. 10, no. 21, pp. 88–99, Sep. 2022, doi: 10.36825/riti.10.21.008.
- [6] B. Jones, “Dryad Networks Demonstrates First Fully Functional Drone Prototype for Detecting, Locating and Monitoring Wildfires,” Dryad.
- [7] H. El, “¿Cómo utilizar el sensor detector de incendios IoT para la detección de incendios forestales?,” MOKOSMART.
- [8] M. McNabb, “Drone Technology Enhances Early Detection of Forest Fires,” Drone Life.
- [9] D. J. Altamirano, M. Ángel Ordóñez, B. Tutor, and R. P. Murillo, “Percepción y vulnerabilidad social por incendios forestales por las comunidades de un sector de transición urbano-rural de los cerros del municipio de Cali, Valle del Cauca,” Universidad católica de Manizales, Manizales, 2021.
- [10] M. Alfredo, P. Moreira, I. W. Fabricio, and G. Castro Mg, “Artículo de investigación Propuesta para la prevención, mitigación y control de incendios forestales.,” *Revista Social Fronteriza*, Feb. 2024, doi: 10.59814/resofro.2024.4(1)e183.
- [11] PNUD, “¿Qué es la adaptación al cambio climático y por qué es crucial?,” PNUD.
- [12] Ideam, “El Ideam presenta nuevas proyecciones climáticas para Colombia: Escenarios de Cambio Climático al 2100,” Ideam. Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://ideam.gov.co/sala-de-prensa/noticia/el-ideam-presenta-nuevas-proyecciones-climaticas-para-colombia-escenarios-de-cambio-climatico-al>
- [13] J. L. Arias and D. Mena Borrero, “El Fenómeno del Niño,” *fedepalma*.
- [14] C. Bohórquez Ramírez, “Estos son los graves impactos que dejaron 20 incendios forestales en un solo fin de semana en Cali: animales silvestres arrasados por las llamas,” El Tiempo.

- Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/estos-son-los-graves-impactos-que-dejaron-20-incendios-forestales-en-un-solo-fin-de-semana-en-cali-animales-silvestres-arrasados-por-las-llamas-3379517>
- [15] G. Mora and J. Eduardo, “INCENDIOS FORESTALES: causas e impactos,” Jun. 2020.
- [16] C. Bohórquez Ramírez, “Lo que se sabe del voraz incendio que consumió 17,6 hectáreas de cerro Cristo Rey,” *El Tiempo*. Accessed: Mar. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/esto-es-lo-que-se-sabe-del-voraz-incendio-forestal-que-consumio-zonas-en-cerro-cristo-rey-847656>
- [17] Redacción BLU Radio, “CVC y Fuerza Aérea sobrevolaron nueve puntos críticos de incendios forestales en Cali.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.bluradio.com/regiones/pacifico/cvc-y-fuerza-aerea-sobrevolaron-9-puntos-criticos-de-incendios-forestales-en-cali-rg10>
- [18] A. Topan Indra, H. Harmadi, and M. Marzuki, “Prototype of Forest and Land Fire Monitoring and Detection System Using IoT-Based WSN Technology,” *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol. 9, no. 12, pp. 11837–11845, Dec. 2023, doi: 10.29303/jppipa.v9i12.5736.
- [19] R. Krishnamurthi, A. Kumar, D. Gopinathan, A. Nayyar, and B. Qureshi, “An overview of iot sensor data processing, fusion, and analysis techniques,” Nov. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20216076.
- [20] K. Jamsa, *Cloud Computing*. Jones & Bartlett Learning.
- [21] D. Y. Bautista- Vivanco, L. N. Oliva-Moreno, and I. Ilizaliturri-Flores, “Monitoreo remoto de variables ambientales a larga distancia con sistemas embebidos,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 12, pp. 40–48, Nov. 2024, doi: 10.29057/icbi.v12iEspecial4.13340.
- [22] J. G. Pausas, *¿Qué sabemos de? Incendios Forestales*. CSIC.
- [23] A. Y. Cambio Climático, “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 Datos y cifras,” 2020. Accessed: Mar. 20, 2025. [Online]. Available: https://www.pseau.org/outils/ouvrages/unesco_informe_mundial_de_las_naciones_unidas_sobre_el_desarrollo_de_los_recursos_hidricos_2020_agua_y_cambio_climatico_datos_y_cifras_2020.pdf

- [24] T. Fin, D. E. Grado, J. Antonio, and P. López, “Implementación de un sistema de alerta temprana de amenazas de seguridad.”
- [25] F. Orgaz Agüera, “Educación ambiental: concepto, origen e importancia. El caso de República Dominicana,” *Revista DELOS Desarrollo Local Sostenible*, Feb. 2018.
- [26] L. G. Páez Solano, “Participación ciudadana: un imperativo para la gobernanza y justicia ambiental en Colombia. Una mirada a las Audiencias Públicas Ambientales. Retos y oportunidades,” Jun. 2024. Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/94cc6581-da34-4690-8ae7-c229ab1a1da0/content#:~:text=La%20participaci%C3%B3n%20ciudadana%20se%20conci%20be,procesos%20de%20toma%20de%20decisiones>
- [27] F. E. Berigüete, J. S. Santos, and I. Rodríguez Cantalapedra, “Digital Revolution: Emerging Technologies for Enhancing Citizen Engagement in Urban and Environmental Management,” *Land (Basel)*, vol. 13, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.3390/land13111921.
- [28] J. E. Usuga, “La Ciencia Ciudadana como Herramienta para la Gestión Costera.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.cifplayas.org/la-ciencia-ciudadana-como-herramienta-para-la-gestion-costera/#:~:text=La%20ciencia%20ciudadana%20es%20una,la%20protecci%C3%B3n%20de%20estos%20espacios>
- [29] B. Kitchenham and S. M. Charters, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering,” 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/302924724>
- [30] V. Kumari and F. A. Ali, “Early Detection of Forest Fire Using Internet of Things,” in *Proceedings of 2022 1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments and Applications, ICIDeA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 24–28. doi: 10.1109/ICIDeA53933.2022.9970130.
- [31] S. Almarri, H. Al Safwan, S. Al Qisoom, S. Gdaim, and A. Zitouni, “Optimized Wireless Sensor Network Architecture for AI-Based Wildfire Detection in Remote Areas,” *Fire*, vol. 8, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.3390/fire8070245.
- [32] A. Haque and H. Soliman, “Smart Wireless Sensor Networks with Virtual Sensors for Forest Fire Evolution Prediction Using Machine Learning,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 14, no. 2, Jan. 2025, doi: 10.3390/electronics14020223.

- [33] S. Sri Durgadevi, S. Nandhini Devi, R. Anuthigsha, and G. Praisly Sherlin Hepsibha, "IoT Based Forest Fire Detection and Extinguishing System," in *4th International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems: Harnessing Power and Energy for an Affordable Electrification of India, ICPECTS 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10779987.
- [34] V. Venkataramanan, G. Kavitha, M. R. Joel, and J. Lenin, "Forest Fire Detection and Temperature Monitoring Alert using IoT and Machine Learning Algorithm," in *Proceedings - 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology, ICSSIT 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 1150–1156. doi: 10.1109/ICSSIT55814.2023.10061086.
- [35] M. Varun, K. Kesavraj, S. Suman, and X. S. Raj, "Integrating IoT and Machine Learning for Enhanced Forest Fire Detection and Temperature Monitoring," in *3rd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications, ICIMIA 2023 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 152–158. doi: 10.1109/ICIMIA60377.2023.10426108.
- [36] V. Balaji Vijayan, T. Dhanalakshmi, P. Parthasarathi, S. Nivedha, R. Krishnamoorthy, and R. Thiagarajan, "Experimental Evaluation of Smart Forest Fire Detection Methodology using Internet of Things and Logical Sensors," in *Proceedings of the 2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 603–608. doi: 10.1109/ICCSP60870.2024.10543364.
- [37] T. V. Muralidhar, V. V. S. Sandeep, P. Manohar, M. L. Krishna, K. Ruthvik, and S. Bagwari, "An IoT based Real Time Forest Fire Detection & Alerting System Using LoRa Communication," in *Proceedings - 11th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 139–144. doi: 10.1109/SPIN60856.2024.10512122.
- [38] A. Sharma, B. S. Sohi, and S. Chandra, "Design and Testing of a Forest Fire Detection System," 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/371990894>
- [39] P. Negi, S. Kathuria, R. Singh, V. Pachouri, and N. Kathuria, "Forest Fire Detection via the Internet of Things-Based Systems," in *Proceedings - 2023 3rd International Conference on*

- Pervasive Computing and Social Networking, ICPCSN 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 1144–1149. doi: 10.1109/ICPCSN58827.2023.00194.
- [40] “Manifesto for Agile Software Development.” Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: <https://agilemanifesto.org/>
- [41] Jeff. Gothelf and Josh. Seiden, *Lean UX: designing great products with Agile teams*. O’Reilly, 2016.
- [42] D. A. . Norman, *The design of everyday things*. Basic Books, 2013.
- [43] Yida, “DHT11 vs DHT22 – Which Temperature and Humidity Sensor Should You Use?,” Seed Studio.
- [44] R. S. Sinha, Y. Wei, and S. H. Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT,” Mar. 01, 2017, *Korean Institute of Communications Information Sciences*. doi: 10.1016/j.ict.2017.03.004.
- [45] Secretaría de Ambiente de Bogotá, “Bogotá en alerta por incendios forestales.”
- [46] GOV.CO, “Grupo Especializado en la Gestión Integral del Riesgo contra Incendios Forestales.”
- [47] F. Shahzad *et al.*, “Comparing machine learning algorithms to predict vegetation fire detections in Pakistan,” *Fire Ecology*, vol. 20, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1186/s42408-024-00289-5.
- [48] S. Yfanti and N. Sakkas, “Technology Readiness Levels (TRLs) in the Era of Co-Creation,” *Applied System Innovation*, vol. 7, no. 2, Apr. 2024, doi: 10.3390/asi7020032.
- [49] T. Liu and G. Research, “JANNAF Guidelines for the Application of Technology Readiness Levels (TRLs) to Micro-Propulsion Systems, 2022 Edition.”
- [50] Y. Khomenko and S. Babichev, “Modular IoT Architecture for Monitoring and Control of Office Environments Based on Home Assistant,” *IoT*, vol. 6, no. 4, p. 69, Nov. 2025, doi: 10.3390/iot6040069.
- [51] M. Esposito, L. Palma, A. Belli, L. Sabbatini, and P. Pierleoni, “Recent Advances in Internet of Things Solutions for Early Warning Systems: A Review,” Mar. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22062124.
- [52] L. Nkechi Orlu and E. Francisca Ifeoma, “Leveraging The Internet Of Things (IOT) For Promoting Sustainable Peace And Justice In Communities”, doi: 10.5281/zenodo.16569139.

- [53] R. Almutairi, G. Bergami, and G. Morgan, “Advancements and Challenges in IoT Simulators: A Comprehensive Review,” Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/s24051511.

11. ANEXOS

Anexo A

https://docs.google.com/spreadsheets/d/115yvbE3SaBHYLEp_Nhl8oGYcIgfqcp9f/edit?usp=sharing&oid=118126198413621829713&rtpof=true&sd=true

Anexo B

<https://valoaiza2001.github.io/guardabosques/>

Anexo C

<https://github.com/valenzmj2001/Modelo-de-predicci-n-de-incendios-forestales>