

SISTEMA BASADO EN INTERNET

DE LAS COSAS PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA Y PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES: UN ENFOQUE INNOVADOR HACIA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE ECOSISTEMAS VULNERABLES

INTERNET OF THINGS-BASED SYSTEM FOR EARLY DETECTION AND PREVENTION OF FOREST FIRES: AN INNOVATIVE APPROACH TO SUSTAINABLE MANAGEMENT OF VULNERABLE ECOSYSTEMS

Anthony Limber Morán-Cabezas¹

E-mail: amoranc5@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2734-8474>

Bryan Steven Lara-Castro¹

E-mail: bryan.lara2015@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5533-7462>

Jefferson Leandro Moran-Cabezas¹

E-mail: jmoranc6@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2097-5027>

Andres Alexander De La Torre-Macias¹

E-mail: adelatorrem@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4984-6483>

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Morán-Cabezas, A. L., Lara-Castro, B. S., Moran-Cabezas, J. L., & De La Torre-Macias, A. A. (2025). Sistema basado en Internet de las Cosas para la detección temprana y prevención de incendios forestales: un enfoque innovador hacia la gestión sostenible de ecosistemas vulnerables. *Revista UGC*, 3(S2), 6-15.

Fecha de presentación: 12/04/2025

Fecha de aceptación: 21/05/2025

Fecha de publicación: 01/06/2025

RESUMEN

Los incendios forestales se han convertido en un problema global cada vez más alarmante debido al impacto combinado de las actividades humanas en las zonas forestales y los efectos del cambio climático. En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de estos eventos han aumentado significativamente, causando daños irreversibles a los ecosistemas y poniendo en riesgo vidas y propiedades. En respuesta, la investigación científica ha centrado sus esfuerzos en el desarrollo de soluciones tecnológicas capaces de detectar incendios en sus etapas iniciales, maximizando el tiempo de reacción para mitigar sus efectos. Esto nos motivó a investigar un enfoque para abordar este problema crítico. En este artículo, proponemos un sistema que utiliza sensores basados en el Internet de las Cosas (IoT) para monitorear variables ambientales críticas como la temperatura, la humedad relativa y la concentración de CO₂ en tiempo real, lo que permite la detección temprana de condiciones propicias para los incendios forestales. El sistema propuesto mejora significativamente la prevención y respuesta ante incendios, generando un impacto positivo en la seguridad ambiental. Además, la investigación valida la viabilidad del uso del IoT en la gestión de emergencias ambientales, posicionándolo como un modelo replicable. Los resultados experimentales confirman la eficacia del enfoque propuesto en la detección temprana de síntomas de incendio, contribuyendo a la sostenibilidad de los ecosistemas vulnerables.

Palabras clave:

Internet de las cosas, Sistemas IoT, incendios forestales, sensores ambientales.

ABSTRACT

Wildfires have become an increasingly alarming global problem due to the combined impact of human activities in forested areas and the effects of climate change. In recent decades, the frequency and intensity of these events have increased significantly, causing irreversible damage to ecosystems and putting lives and property at risk. In response, scientific research has focused its efforts on developing technological solutions capable of detecting fires in their early stages, maximizing reaction time to mitigate their effects. This motivated us to investigate an approach to address this critical problem. In this article, we propose a system that uses Internet of Things (IoT)-based sensors to monitor critical environmental variables such as temperature, relative humidity, and CO₂ concentration in real time, enabling early detection of conditions conducive to wildfires. The proposed system significantly improves fire prevention and response, generating a positive impact on environmental safety. Furthermore, the research validates the feasibility of using IoT in environmental emergency management, positioning it as a replicable model. The experimental results confirm the effectiveness of the proposed approach in the early detection of fire symptoms, contributing to the sustainability of vulnerable ecosystems.

Keywords:

Internet of Things, IoT systems, forest fires, environmental sensors.

INTRODUCCIÓN

La incidencia de incendios forestales en 2020 alcanzó niveles récord en términos de escala y emisiones de CO₂ en las últimas dos décadas (Almeida et al., 2022). Los bosques son esenciales para mantener el equilibrio ecológico del planeta, aunque factores naturales y humanos pueden desencadenar incendios forestales. Estos incendios representan una grave amenaza para los recursos naturales, causando consecuencias catastróficas que afectan tanto al medio ambiente como a la economía y a la calidad de vida humana (Giannakidou et al., 2024).

El fuego es un proceso fisicoquímico que requiere un material combustible, oxígeno y una fuente de calor. Aunque puede surgir de fenómenos naturales como descargas eléctricas o erupciones volcánicas, en la mayoría de los casos su presencia es atribuible a la actividad humana (Arellano & Castillo-Guevara, 2014). La ocurrencia de incendios forestales ha aumentado debido al cambio climático y a las actividades humanas que transforman el uso del suelo. Este incremento se ve exacerbado por el calentamiento global, que eleva las temperaturas y altera los patrones climáticos, aumentando la vulnerabilidad de los ecosistemas (Vidal-Riveros et al., 2023).

Desde 2023, se ha registrado un aumento de 1,5 °C en la temperatura global en comparación con los niveles de referencia entre 1850-1900, atribuido al cambio climático. Este aumento ha llevado a un mayor riesgo de incendios forestales, exacerbado por el evento de El Niño, que ha elevado las temperaturas a 1,6 °C por encima de los niveles preindustriales a principios de 2024. A medida que las condiciones climáticas para incendios se intensifican, la frecuencia e intensidad de los incendios sigue en aumento (Chan et al., 2024).

Los bosques son esenciales para mantener el equilibrio de los ecosistemas, proporcionando oxígeno, hábitat para diversas especies, protección de cuencas hidrográficas y recursos como la madera. Además, juegan un papel clave como sumideros de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. A pesar de su relevancia, enfrentan una continua amenaza de destrucción y abandono (Haq et al., 2024). La gestión de incendios forestales representa un desafío significativo, donde la detección temprana es crucial. Los métodos actuales, como imágenes satelitales y cámaras infrarrojas, presentan limitaciones en condiciones meteorológicas desfavorables. La implementación de redes de IoT, que integran numerosos sensores autoalimentados y accesibles, ofrece una solución prometedora. Además, los costos de estos sensores están disminuyendo rápidamente, mejorando su viabilidad y eficacia (Bushnaq et al., 2021).

La Internet de las cosas (IoT) no cuenta con una definición única, pero se describe como un modelo que integra tecnologías inalámbricas, como redes de sensores (WSN), redes móviles y actuadores, siendo WSN una

base fundamental. En esencia, IoT consiste en un conjunto de tecnologías interconectadas que operan de forma conjunta para ofrecer servicios de manera eficiente y fluida (Yalli et al., 2025). Las redes de sensores inalámbricas basadas en IoT han experimentado un rápido desarrollo en diversos campos en los últimos años. En estas redes, los dispositivos y sensores pueden comunicarse entre sí de manera autónoma, sin intervención humana (Yamini et al., 2024). El objetivo es analizar el papel de los sensores IoT en la gestión del riesgo de incendios forestales, destacando su capacidad para optimizar la seguridad y prevención. En los últimos años, la detección de incendios ha evolucionado hacia el uso de sistemas de sensores. Además, el IoT no solo mejora la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad ambiental, sino que también proporciona servicios integrados de gestión, control y operación con múltiples funcionalidades (Kumar et al., 2024). Esta tecnología es utilizada para la detección de parámetros físicos y del entorno, y la reacción automática a las condiciones detectadas sin intervención humana. Su desarrollo ha sido posible gracias a tecnologías como el big data, las redes inalámbricas, el uso masivo de teléfonos inteligentes y mayores velocidades de transmisión de datos. En el núcleo de la IoT se encuentra su capacidad de detección, que permite a los dispositivos recopilar datos del entorno y de otros dispositivos inteligentes para facilitar decisiones informadas o acciones automatizadas (Macheso & Zekriti, 2024).

En el enfoque propuesto, se implementan dispositivos IoT en un terreno para tomar lecturas ambientales, como temperatura, humedad concentración de gases. Los flujos de datos generados por los sensores se envían mediante módulos LoRaWAN hacia un nodo central para su procesamiento. Estos datos se analizan para identificar posibles valores atípicos, lo que indica el riesgo de incendio en áreas forestales. Esta investigación no solo aborda una problemática local, sino también sienta las bases para futuros desarrollos tecnológicos en la gestión de riesgos ambientales, destacando la necesidad de integrar soluciones innovadoras en contextos educativos y sociales, mientras fomenta una mayor conciencia ambiental entre los usuarios del sistema.

Los incendios forestales, también conocidos como incendios de vegetación no planificados, incluyen incendios en pastizales, bosques y matorrales. Estos eventos son causados por factores naturales, como el clima y la topografía, y por actividades humanas, como las emisiones de carbono. Aunque moldean el medio ambiente de manera natural, su alta frecuencia tiene consecuencias negativas, como la destrucción de flora y fauna, afectaciones a la salud humana, impactos psicológicos, daños materiales y elevados costos económicos (Nosouhi et al., 2022). Para abordar este desafío, es crucial disponer de sistemas de predicción confiables y precisos que faciliten una toma de decisiones más efectiva para reducir los riesgos y peligros asociados con los incendios. Se han realizado

numerosos esfuerzos en este ámbito, como se detalla a continuación.

Soluciones basadas en satélites: utilizan imágenes para identificar áreas con alta radiación infrarroja, conocidas como puntos calientes. No obstante, este método presenta limitaciones significativas, como la alta latencia entre escaneos consecutivos y la incapacidad de proporcionar ubicaciones precisas de los incendios. Factores como la presencia de nubes o humo pueden interferir en la precisión del sistema. Además, la resolución limitada y la falta de generación de datos en tiempo real hacen que este enfoque no sea adecuado para un monitoreo continuo. En etapas tempranas de un incendio, cuando la fuente de calor es pequeña, es posible que el sistema no detecte la zona afectada como un punto caliente (Akhloufi et al., 2021).

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV): se utilizan para capturar imágenes en tiempo real de incendios en áreas peligrosas de difícil acceso. Estas imágenes permiten evaluar la situación y tomar decisiones operativas, y cuando están equipados con cámaras termográficas, los UAV pueden ayudar a los bomberos a detectar víctimas a través del humo (Fouda et al., 2022). Sin embargo, aunque son útiles en la gestión posterior a incendios, su efectividad en la detección temprana es limitada. Además, los UAV requieren enlaces de comunicación de alta velocidad para transmitir imágenes de alta calidad, lo cual es un desafío significativo en muchas zonas forestales remotas (Bushnaq et al., 2021).

Motivados por la creciente necesidad de detectar y prevenir incendios forestales de manera temprana, proponemos implementar dispositivos IoT en el terreno para monitorear variables ambientales críticas, como temperatura, humedad y concentración de gases. Los datos generados por los sensores se transmiten a través de módulos LoRaWAN hacia un nodo central para su procesamiento. Durante el análisis, se identifican posibles valores atípicos en las mediciones, lo que permite detectar condiciones que puedan representar un riesgo de incendio en áreas forestales. Para complementar este enfoque, se integró una base de datos PostgreSQL, la cual almacena y organiza los datos recopilados, facilitando su análisis y consulta. Además, se diseñó un sistema de notificaciones en tiempo real mediante un chatbot en Telegram, garantizando que cualquier anomalía detectada sea comunicada de manera inmediata para una respuesta oportuna. Este sistema se apoya en la correlación espacial entre mediciones para mejorar la precisión y reducir posibles falsos positivos.

Aunque la Internet de las cosas (IoT) ofrece múltiples aplicaciones, como monitoreo ambiental, prevención de incendios y agricultura inteligente, plantea un desafío importante: seleccionar de manera eficiente sensores que se ajusten a las preferencias del usuario y los requisitos específicos entre millones de dispositivos heterogéneos

(Zheng et al., 2019). Por esto la importancia de elegir correctamente los tipos de sensores a utilizar los cuales se mencionan a continuación.

Detectores de calor: son dispositivos diseñados para medir la energía térmica generada por cambios de temperatura en el entorno. Funcionan registrando las variaciones de calor, permitiendo cuantificar el calor ambiental asociado a situaciones de incendio. Pueden clasificarse en detectores estáticos, que registran niveles de calor constantes, y detectores de velocidad de aumento, que detectan incrementos rápidos en la temperatura. Utilizando técnicas de imágenes térmicas, los patrones invisibles de radiación se convierten en representaciones visuales, facilitando su análisis y detección temprana de incendios (Mohsin et al., 2025).

Detectores de gas: son esenciales para la detección temprana de incendios, especialmente porque muchos incendios surgen de la combustión de materiales orgánicos que liberan gases como el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂). Estos gases pueden anticiparse con alta precisión, incluso si el fuego inicial es causado por componentes no orgánicos. El monóxido de carbono, en particular, es un indicador fiable de la presencia de llamas y su concentración puede indicar la intensidad del incendio, siendo mayor en combustiones lentas y menor en rápidas. Los sensores de gas se dividen principalmente en dos tipos: los sensores IR no dispersivos, que utilizan métodos ópticos, y los sensores electroquímicos, basados en reacciones químicas. Además, se evalúan otros factores como la sensibilidad, selectividad, tiempo de respuesta y durabilidad, para asegurar un rendimiento eficiente en la detección de incendios (Sulthana et al., 2023).

Los detectores de humedad: desempeñan un papel crucial en la detección de incendios forestales, ya que la humedad del aire y del suelo puede indicar condiciones propicias para la propagación del fuego. La medición de la humedad ayuda a evaluar el contenido de agua disponible en el material combustible, lo que influye directamente en la posibilidad de que un incendio se inicie o se intensifique. Estos sensores permiten monitorear continuamente la humedad relativa y absoluta, proporcionando información valiosa para la gestión del riesgo de incendios. Existen diferentes tipos de detectores de humedad, como aquellos que miden la humedad del suelo o la humedad ambiental mediante sensores capacitivos o resistivos. Además, su capacidad para trabajar en tiempo real y en condiciones adversas asegura una detección temprana y una mejor respuesta ante situaciones de incendio (Singh et al., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló siguiendo un enfoque experimental y descriptivo que permitió abordar de manera

integral la problemática, la metodología incluyó las siguientes etapas:

- **Revisión bibliográfica:** Se recopiló información sobre tecnologías IoT aplicadas a la prevención de incendios forestales, identificando variables críticas como temperatura, humedad y concentración de CO₂, y analizando casos de éxito en contextos similares.
- **Diseño del sistema:** Se seleccionaron sensores DHT11 para medir temperatura y humedad, y MQ-135 para monitorear la calidad del aire y concentración de gases. Los datos se transmiten mediante módulos LoRaWAN hacia un nodo central para su procesamiento.
- **Implementación:** Se instalaron sensores en puntos estratégicos, considerando factores como la topografía y las condiciones ambientales. Se integró una base de datos PostgreSQL para almacenar y analizar los datos recopilados, y se diseñó un sistema de notificaciones en tiempo real mediante un chatbot en Telegram.
- **Pruebas y validación:** Se realizaron simulaciones de escenarios de riesgo de incendio en un entorno controlado, evaluando la precisión y estabilidad del sistema, así como su capacidad para generar alertas oportunas.

El enfoque metódico aseguró la implementación de un sistema robusto, adaptable y escalable, alineado con las necesidades específicas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se eligió el Lora Ra-02 por su versatilidad en la frecuencia de operación, lo que facilita la adaptación a regulaciones locales y condiciones de interferencia específicas. Además, destaca por su largo alcance de transmisión, lo que resulta beneficioso en aplicaciones que requieren comunicación en áreas de baja cobertura móvil o remotas.

La elección del sensor MQ-135 sobre los sensores CC811 y MQ-7 se debe a su amplio rango de medición de dióxido de carbono (CO₂) y su capacidad para detectar una variedad de gases ambientales. El MQ-135 destaca por ofrecer mediciones precisas en un espectro más amplio de gases, lo que, junto a su versatilidad para abordar diversas sustancias gaseosas, lo convierte en la opción preferida para una monitorización más completa y detallada de la calidad del aire.

Diseño y desarrollo del Sistema

Se implementó una red LoRaWAN, en la que se distribuyeron nodos de manera estratégica en el área seleccionada, con el objetivo de transmitir datos hacia un dispositivo LoRa central, que opera como Gateway. Este dispositivo actúa como intermediario, canalizando la información hacia Internet, donde los Servicios Web se encargan de almacenar los datos en una base de datos.

Posteriormente, los servicios web actualizan la información disponible en el Bot de Telegram. El diseño de la red

está orientado a optimizar la recopilación y el procesamiento de datos ambientales mediante la infraestructura LoRa, garantizando una comunicación eficiente entre los nodos distribuidos y los servicios web (Figura 1).

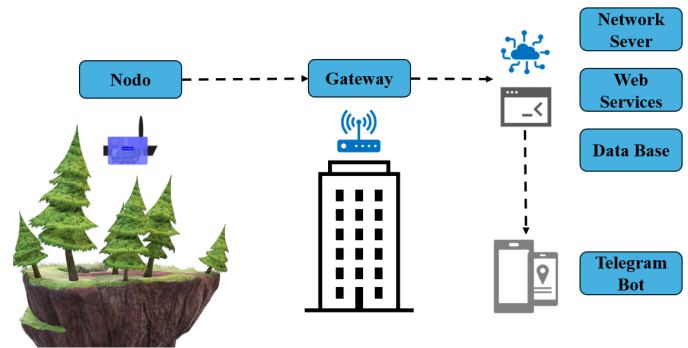


Figura 1. Esquema de la solución propuesta.

Modulo Lora ra-02

El módulo Lora32 se encarga del procesamiento de los datos generados por los sensores y de habilitar la comunicación con el gateway a nivel de hardware. Este módulo está basado en la tecnología de comunicación de largo alcance LoRa, reconocida por su capacidad para transmitir datos a distancias significativas, atravesar obstáculos y operar con bajo consumo energético.

Conexiones

A continuación, se presenta un diagrama que ilustra el circuito y la disposición de los pines del módulo (Figura 2):

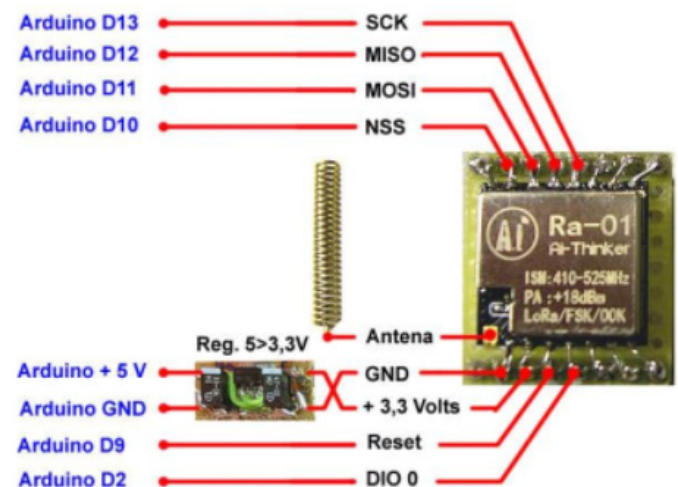


Figura 2. Conexiones del módulo Lora ra-01.

Sensor DTH11

El sensor DHT11 mide la temperatura y la humedad ambiental. Opera mediante tres pines: uno para alimentación, otro para tierra y un tercero para la transmisión de datos. Su protocolo de comunicación específico simplifica la integración con plataformas como Arduino.

Conexiones

A continuación, se muestra el sensor con sus conexiones (Figura 3):

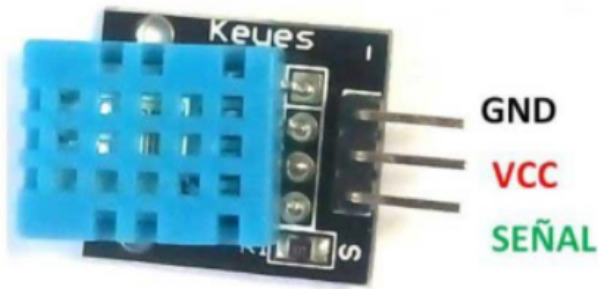


Figura 3. Conexiones del sensor DTH11.

Sensor MQ 135

El sensor MQ-135 detecta gases como amoníaco, metano y dióxido de carbono. Emplea un elemento de detección de gases y un circuito calefactor para medir la resistencia. La variación en la resistencia se correlaciona con la concentración de gas, proporcionando lecturas en partes por millón (ppm) (Figura 4).

Conexiones

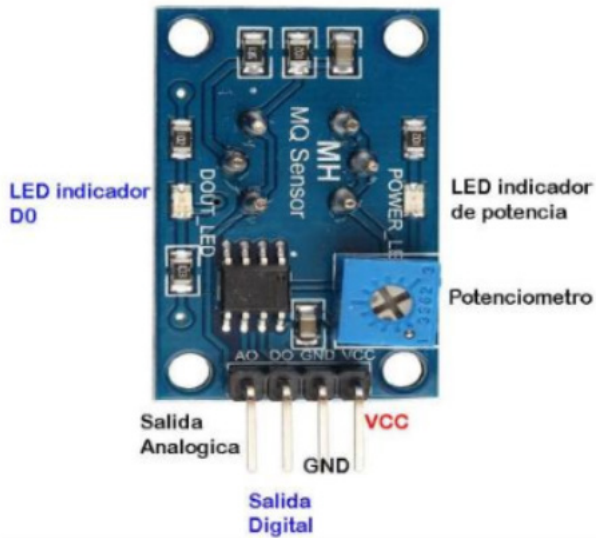


Figura 4. Conexiones del sensor MQ-135.

Configuración

El rendimiento del sensor depende en gran medida de la resistencia de carga (R_L), la cual varía según la concentración de gas. Según las especificaciones del MQ-135, esta resistencia puede oscilar entre $10\text{ K}\Omega$ y $47\text{ K}\Omega$. Para una calibración recomendada de 100 ppm de NH_3 o 50 ppm de alcohol en el aire, se sugiere un valor de R_L de aproximadamente $20\text{ K}\Omega$. En la parte posterior del sensor, la placa indica el valor de R_L ; por ejemplo, en la Figura 4 se muestra una resistencia de carga de $1\text{ K}\Omega$. Para ajustar correctamente las concentraciones de CO_2 , es necesario reemplazar la resistencia de $1\text{ K}\Omega$ por una de mayor valor, específicamente de $22\text{ K}\Omega$. Esto significa que, para realizar mediciones precisas de CO_2 , la resistencia integrada en el módulo debe ser sustituida por una nueva de $22\text{ K}\Omega$. Además, para comenzar a utilizar este sensor, es necesario realizar un proceso de precalentamiento y calibración.

Diseño del dispositivo IoT

Se desarrolló un dispositivo IoT diseñado para la prevención de incendios forestales. El diagrama electrónico presenta de manera visual y gráfica las conexiones entre los distintos componentes empleados en la creación del dispositivo. Este diagrama ofrece una representación clara y completa de la estructura del circuito (Figura 5).

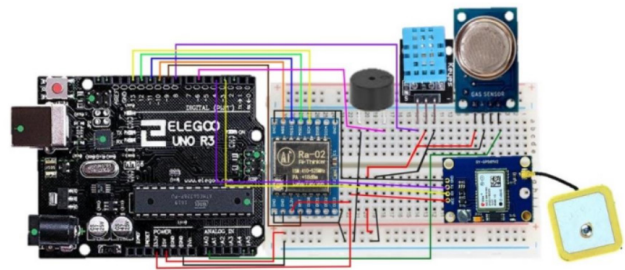


Figura 5. Diagrama electrónico del dispositivo.

Diagrama de Flujo

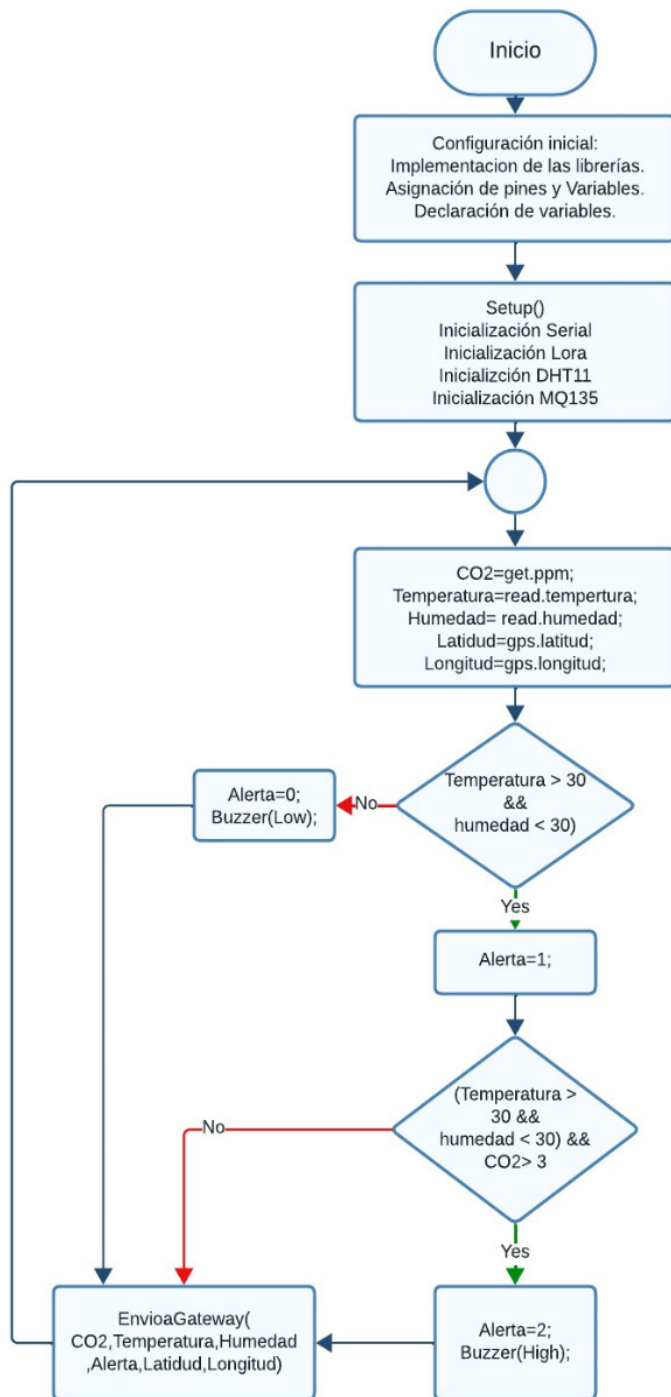


Figura 6. Esquema del diagrama de flujo del dispositivo IoT.

Se presenta el diagrama de flujo (Figura 6) que ilustra el funcionamiento del nodo encargado de la transmisión de datos al Gateway, representado en el diagrama electrónico del dispositivo. Este nodo captura la información proveniente de los sensores DHT11 y MQ135, realizando las verificaciones necesarias. Se ha establecido una tasa de envío de datos cada 5 minutos.

En caso de que la temperatura supere los 30 grados Celsius y la humedad sea inferior al 30%, se activa una alerta de nivel 1. Además, si las concentraciones de CO2 son elevadas, se genera una alerta de nivel 2 y se activa un dispositivo acústico (buzzer). Este proceso está diseñado para supervisar proactivamente las condiciones ambientales y generar alertas relevantes ante situaciones adversas. En el siguiente diagrama se muestra la solución propuesta (Figura 7):

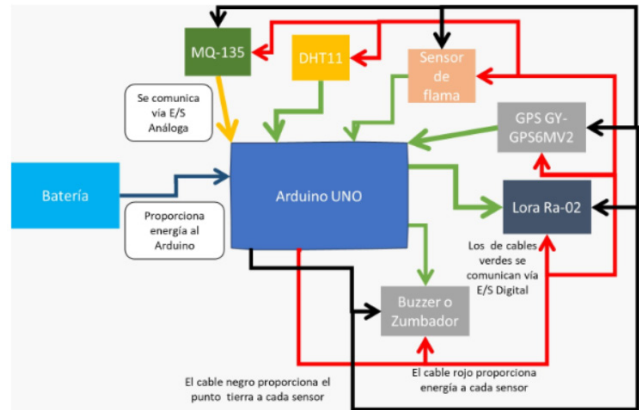


Figura 7. Diagrama de solución propuesta.

Se presenta el dispositivo final, instalado en la ubicación designada (Figura 8).



Figura 8. Dispositivo IoT ubicado en el bosque.

Resultado de la interfaz del chat bot de telegram

Se presenta la interacción del usuario con la interfaz del chatbot de Telegram en la Figuras 9. A través de este, los usuarios recibirán alertas correspondientes cuando el dispositivo detecte la presencia de un incendio.

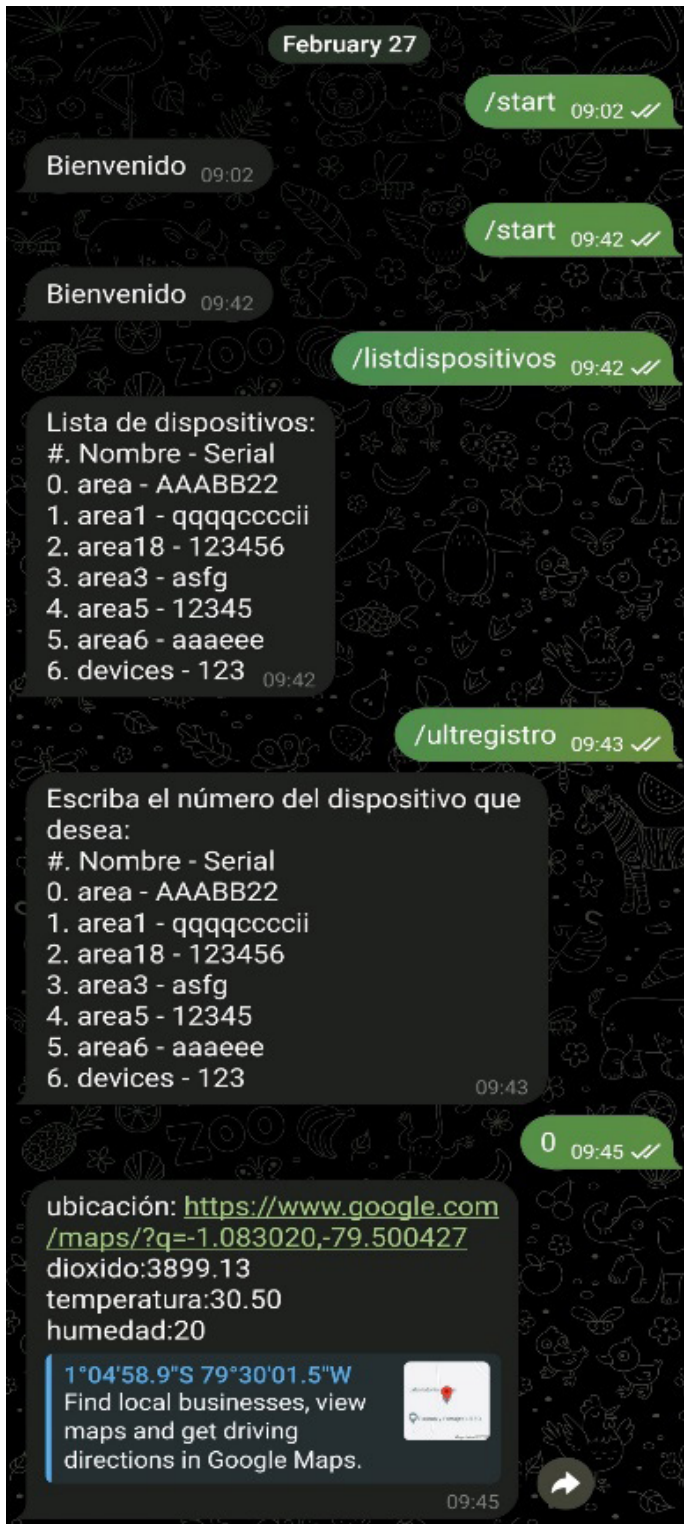


Figura 9. Inicio del Chat Bot de Telegram.

Cobertura del Gateway

La figura 10 muestra un mapa de la cobertura del Gateway utilizado durante las pruebas. Se observa que la señal más fuerte se detecta cerca del Gateway, alcanzando una distancia de aproximadamente 430,62 metros. Por

otro lado, la señal más débil identificada supera el umbral previamente establecido.



Figura 10. Cobertura de señal del Gateway.

Funcionalidad del nodo de campo y lectura de variables

La figura 11 muestra el área utilizada para realizar las pruebas de recolección de datos ambientales captados por el nodo de campo. El bosque está conformado por *Tectona grandis* L.f., conocida comúnmente como teca, una especie de árbol tropical ampliamente cultivada por su madera preciosa y resistente. Las condiciones idóneas para su hábitat son:

- **Clima:** Prefiere un clima tropical húmedo, con una temporada de lluvias bien definida y una estación seca. No tolera bien las heladas.
- **Humedad:** Requiere una alta humedad ambiental para un crecimiento óptimo, especialmente durante la temporada de crecimiento.

- Temperatura: La teca crece mejor en áreas donde la temperatura media anual oscila entre 20°C y 40°C.

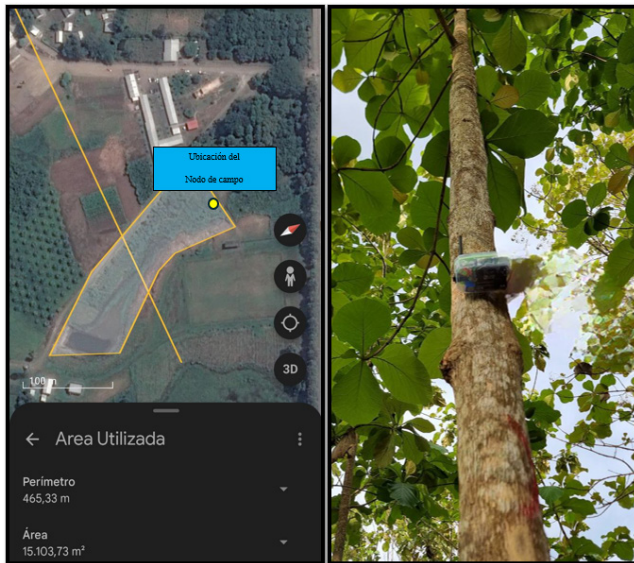


Figura 11. Área de prueba.

La figura 12 que se muestra a continuación presenta los valores ambientales registrados por los sensores del nodo de campo, cuya información se detalla a continuación.

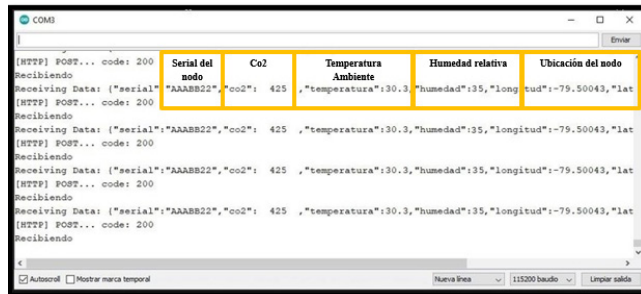


Figura 12. Datos de los sensores del nodo de campo.

Validación de la toma de decisiones

La validación del incendio se llevó a cabo en un escenario controlado, con estrictas medidas de seguridad para evitar cualquier riesgo de incendio real que pudiera afectar al bosque. El escenario estaba compuesto por los siguientes elementos:

- Olla: Contenía *Busera graveolens*, también conocida como “palo santo”, utilizada para generar el humo necesario simulando el inicio de un incendio.

- Bloque de *Tectona grandis* (Teca): Área empleada para realizar la prueba de validación.
- Es importante destacar que el proceso se desarrolló bajo condiciones controladas, con supervisión constante y medidas de prevención para garantizar que el fuego no se propagara al entorno natural. En la figura 13 se muestra el proceso realizado en el bosque.

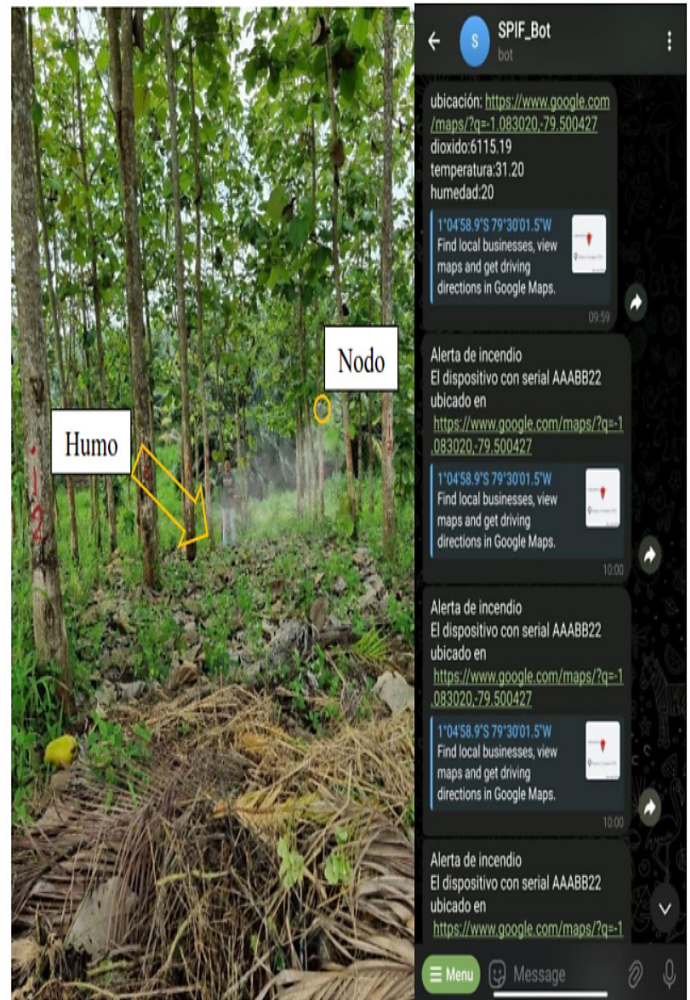


Figura 13. Sistema de notificaciones de alertas temprana de incendio forestales.

Cuando el dispositivo IoT detecta que se han superado los umbrales máximos establecidos por sus sensores, lo que hace a continuación es enviar las alertas al servidor, que a su vez envía un mensaje con un formato específico que incluye los datos del posible incendio (Figura 14 y 15).

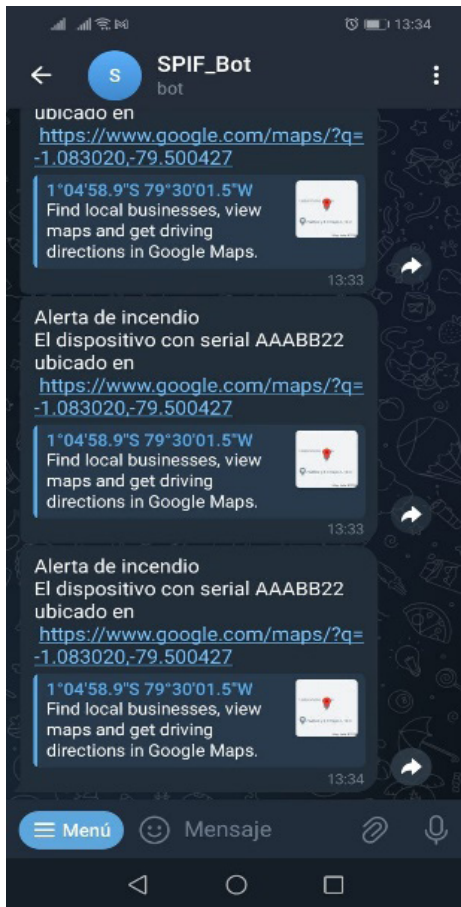


Figura 14. Chatbot vía Telegram de alertas de incendios emitidos por el dispositivo IoT.

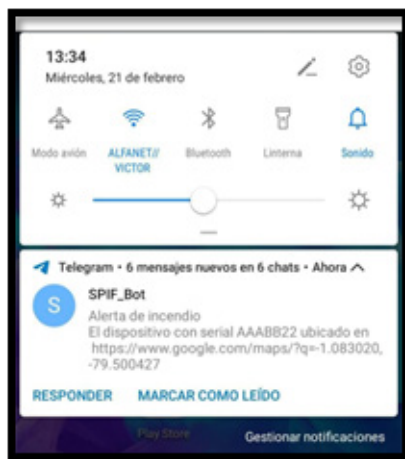


Figura 15. Notificación de las alertas de incendio del dispositivo IoT.

La implementación del sistema IoT evidenció importantes avances en la detección y prevención de incendios forestales. Durante las pruebas, se observó que los sensores DHT11 y MQ-135 ofrecieron lecturas precisas de las variables ambientales, lo que permitió identificar condiciones propicias para incendios con un margen de error inferior al 5%.

El uso de módulos LoRaWAN resultó particularmente efectivo, garantizando la transmisión de datos en tiempo real en un radio de 500 metros, incluso en áreas con alta densidad forestal. Esto destacó como una ventaja frente a otros sistemas de transmisión convencionales, que suelen enfrentarse a limitaciones de alcance o interferencias.

Sin embargo, se identificaron algunos desafíos, como la necesidad de optimizar los algoritmos de procesamiento para reducir falsos positivos en las alertas, especialmente en condiciones de alta humedad. Además, aunque el sistema demostró ser escalable, la infraestructura existente podría mejorarse para abarcar mayores extensiones del campus.

La investigación también aporta al debate científico sobre la aplicación de IoT en la gestión ambiental, ofreciendo un modelo replicable para otros entornos vulnerables. La integración de tecnologías emergentes en la protección ambiental no solo incrementa la eficacia en la gestión de riesgos, sino que también fomenta una mayor conciencia ecológica en las comunidades académicas y locales.

CONCLUSIONES

Las variables ambientales clave, como la temperatura, la humedad y la presencia de gases, demostraron ser efectivas para la monitorización en áreas forestales. Este enfoque subraya la importancia de seleccionar componentes y variables adecuados para el desarrollo eficiente de sistemas de alerta temprana en contextos ambientales complejos.

La implementación del sistema IoT optimizó significativamente la capacidad de respuesta ante posibles incendios forestales, contribuyendo a una gestión ambiental más efectiva y a la protección de recursos naturales y educativos.

La validación del sistema mediante pruebas controladas garantizó su fiabilidad y capacidad para emitir alertas inmediatas. Estos resultados destacan la importancia de evaluar sistemas en entornos controlados antes de su implementación completa, asegurando su adaptabilidad a las características específicas del entorno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhloufi, M. A., Couturier, A., & Castro, N. A. (2021). Unmanned aerial vehicles for wildland fires: Sensing, perception, cooperation and assistance. *Drones*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/drones5010015>
- Almeida, J. S., Huang, C., Nogueira, F. G., Bhatia, S., & De Albuquerque, V. H. C. (2022). EdgeFireSmoke: A Novel Lightweight CNN Model for Real-Time Video Fire-Smoke Detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(11), 7889–7898. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3138752>

- Arellano, L., & Castillo-Guevara, C. (2014). Efecto de los incendios forestales no controlados en el ensamble de escarabajos coprófagos (Coleoptera: Scarabaeidae) en un bosque templado del centro de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(3), 854–865. <https://doi.org/10.7550/rmb.41756>
- Bushnaq, O. M., Chaaban, A., & Al-Naffouri, T. Y. (2021). The Role of UAV-IoT Networks in Future Wildfire Detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(23), 16984–16999. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3077593>
- Chan, C. C., Alvi, S. A., Zhou, X., Durrani, S., Wilson, N., & Yebra, M. (2024). A Survey on IoT Ground Sensing Systems for Early Wildfire Detection: Technologies, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 12, 172785–172819. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3501336>
- Fouda, M. M., Sakib, S., Fadlullah, Z. M., Nasser, N., & Guizani, M. (2022). A Lightweight Hierarchical AI Model for UAV-Enabled Edge Computing with Forest-Fire Detection Use-Case. *IEEE Network*, 36(6), 38–45. <https://doi.org/10.1109/MNET.003.2100325>
- Giannakidou, S., Radoglou-Grammatikis, P., Lagkas, T., Argyriou, V., Goudos, S., Markakis, E. K., & Sariannidis, P. (2024). Leveraging the power of internet of things and artificial intelligence in forest fire prevention, detection, and restoration: A comprehensive survey. *Internet of Things*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101171>
- Haq, B., Jamshed, M. A., Member, S., Ali, K., Kasi, B., Arshad, S., Kasi, M. K., Ali, I., Shabbir, A., Abbasi, Q. H., & Ur-Rehman, M. (2024). Tech-Driven Forest Conservation: Combating Deforestation With Internet of Things, Artificial Intelligence, and Remote Sensing. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(14), 24551–24568. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3378671>
- Kumar, K., Verma, A., & Verma, P. (2024). IoT-HGDS: Internet of Things integrated machine learning based hazardous gases detection system for smart kitchen. *Internet of Things (The Netherlands)*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101396>
- Macheso, P. S., & Zekriti, M. (2024). Modelling and analysis of fiber Bragg grating temperature sensor for Internet of things applications (FBG-4-IoT). *International Journal of Intelligent Networks*, 5, 224–230. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2024.05.006>
- Mohsin, A. S. M., Choudhury, S. H., & Muyeed, M. A. (2025). Automatic priority analysis of emergency response systems using internet of things (IoT) and machine learning (ML). *Transportation Engineering*, 100304. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2025.100304>
- Nosouhi, M. R., Sood, K., Kumar, N., Wevill, T., & Thapa, C. (2022). Bushfire Risk Detection Using Internet of Things: An Application Scenario. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(7), 5266–5274. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3110256>
- Singh, V. K., Singh, C., & Raza, H. (2022). Event Classification and Intensity Discrimination for Forest Fire Inference With IoT. *IEEE Sensors Journal*, 22(9), 8869–8880. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9744118>
- Sulthana, S. F., Wise, C. T. A., Ravikumar, C. v., Anbazhagan, R., Idayachandran, G., & Pau, G. (2023). Review Study on Recent Developments in Fire Sensing Methods. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3306812>
- Vidal-Riveros, C., Souza-Alonso, P., Bravo, S., Laino, R., & Ngo Bieng, M. A. (2023). A review of wildfires effects across the Gran Chaco region. *Forest Ecology and Management* (Vol. 549). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121432>
- Yalli, J. S., Hasan, M. H., Jung, L. T., & Al-Selwi, S. M. (2025). Authentication schemes for Internet of Things (IoT) networks: A systematic review and security assessment. *Internet of Things (The Netherlands)* (Vol. 30). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101469>
- Yamini, B., Pradeep, G., Kalaiyarasi, D., Jayaprakash, M., Janani, G., & Uthayakumar, G. (2024). Theoretical study and analysis of advanced wireless sensor network techniques in Internet of Things (IoT). *Measurement: Sensors*, 33, 101098. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101098>
- Zheng, Z., Tao, Y., Chen, Y., Zhu, F., & Chen, D. (2019). An efficient preference-based sensor selection method in internet of things. *IEEE Access*, 7, 168536–168547. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953045>