**TRABAJO DE GRADO**
**Proyecto de Grado**

# Sistema de Monitoreo Inteligente de la Calidad del Aire en Interiores para Humanos y Mascotas, mediante Sensores IoT e Inteligencia Artificial en Pro de la Salud (BioSenseIoT)

Corporación Universitaria Remington.
Facultad de Ingenierías
Ingeniería de Sistemas

Franklin Alexander Colimba Mitis

Giovanny Alberto Flórez Osorio

Tutor

Proyecto de grado

2026

## Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por brindarme la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar satisfactoriamente este proceso académico y profesional.

A mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante durante cada etapa de mi formación. Su confianza y acompañamiento fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mi tutor de trabajo de grado, por sus orientaciones, conocimientos, recomendaciones y acompañamiento académico, los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo y fortalecimiento de este proyecto.

A la institución universitaria por proporcionar los espacios, recursos y formación necesarios para el desarrollo de mis competencias profesionales y personales.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron con sus conocimientos, experiencias, sugerencias y apoyo durante la realización de este trabajo de grado, contribuyendo al logro de los objetivos propuestos.

# Tabla de Contenidos


Resumen ..... 8

Palabras clave ..... 9

Introducción ..... 10

Marco teórico ..... 12

CALIDAD DEL AIRE INTERIOR ..... 12

PRINCIPALES CONTAMINANTES EN ESPACIOS CERRADOS ..... 13

Monóxido de carbono ..... 13

Metano ($ch_4$) ..... 14

Compuestos orgánicos volátiles (covs) ..... 15

IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA SALUD DE LAS MASCOTAS ..... 16

SENSORES DE GAS SEMICONDUCTOR ..... 16

Serie mq de sensores ..... 17

INTERNET DE LAS COSAS (IOT) APLICADO AL MONITOREO AMBIENTAL ..... 22

Microcontrolador esp32 ..... 23

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE ..... 24

PROYECTOS DE MONITOREO IOT CON SENSORES MQ Y ESP32 ..... 24

Objetivos ..... 31

OBJETIVO GENERAL ..... 31

OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 31

Metodología ..... 33

TIPO Y ENFOQUE INVESTIGATIVO ..... 33

INSTRUMENTOS DE VALIDACIÓN ..... 35
ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS ..... 35
CASO DE USO GENERAL ..... 37
DISEÑO DE ARQUITECTURA ..... 38
Diagrama de arquitectura general. ..... 38
Descripción de las capas ..... 39
Diagrama de componentes ..... 41
Descripción de componentes ..... 42
Diagrama de despliegue ..... 43
Resultados y discusión ..... 45
IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO BIOSENSEIOT ..... 45
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ..... 45
Pantalla de inicio de sesión. ..... 45
Vinculación y sincronización del dispositivo iot. ..... 46
Configuración del entorno ..... 47
Registro de mascota ..... 48
Gestión perfil ..... 49
Dashboard. ..... 50
Monitoreo ..... 51
Análisis ..... 52
Alertas ..... 53
Comportamiento sistémico ante eventos de alerta por contaminación ..... 54
Validación del comportamiento del sistema en sesión continua de monitoreo ..... 56
DISCUSIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS ..... 58
Conclusiones ..... 60

Referencias ..... 63

Anexos ..... 66

## Lista de tablas

Tabla 1 Comparación entre proyectos _____ 26

Tabla 2 Requisitos funcionales _____ 36

Tabla 3 Requisitos no funcionales _____ 37

Tabla 4 Descripción de la arquitectura general del sistema _____ 39

Tabla 5 Descripción de Componentes _____ 42

Tabla 6 Resumen de indicadores de rendimiento — Sesión de monitoreo continuo __ 57

Tabla 7 Rendimiento de transmisión IoT — Sesión de validación _____ 58

## Lista de figuras

Figura 1. Sensor MQ4. ..... 19

Figura 2. Sensor MQ7. ..... 20

Figura 3. Sensor MQ135. ..... 22

Figura 4. Microcontrolador ESP32. ..... 24

Figura 5. Diagrama general de casos de uso. ..... 38

Figura 6. Diagrama de arquitectura general. ..... 39

Figura 7. Diagrama de componentes. ..... 41

Figura 8. Diagrama de despliegue. ..... 44

Figura 9. Inicio de sesión. ..... 46

Figura 10. Sincronización hardware y software. ..... 47

Figura 11. Configuración de entorno. ..... 48

Figura 12. CRUD mascota. ..... 49

Figura 13. Gestión de perfil de usuario. ..... 50

Figura 14. Vista Dashboard. ..... 51

Figura 15. Vista monitoreo. ..... 52

Figura 16. Vista de monitoreo. ..... 53

Figura 17. Vista de Alerta. ..... 54

Figura 18. Alerta activa. ..... 55

Figura 19. Recomendación Gemini API. ..... 56

## Resumen

El presente trabajo de grado propone el diseño e implementación de un sistema de monitoreo inteligente de la calidad del aire en espacios interiores, orientado al bienestar de humanos y mascotas. Este sistema integra hardware y software, utilizando un microcontrolador ESP32 y sensores de gases MQ4, MQ7 y MQ135 para la detección de contaminantes como metano, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles.

La metodología empleada fue iterativa e incremental, con un enfoque aplicado y tecnológico, dividida en cinco fases: análisis de requerimientos, diseño de arquitectura, implementación del firmware IoT, desarrollo de las interfaces web y móvil, e integración del módulo de inteligencia artificial. La validación se realizó en entornos reales comparando lecturas de los sensores con valores de referencia documentados.

La información capturada por los sensores es transmitida en tiempo real a Firebase Realtime Database mediante Wi-Fi, y visualizada en una aplicación multiplataforma desarrollada con Next.js (web) y Capacitor (Android). El sistema incorpora un módulo de inteligencia artificial basado en Gemini AI que analiza patrones de contaminación y genera recomendaciones predictivas personalizadas sobre ventilación, ubicación de mascotas y posibles fuentes de contaminación doméstica.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema es capaz de detectar variaciones de concentración de gases con una latencia inferior a 2 segundos, generar alertas categorizadas por nivel de riesgo y producir recomendaciones contextualizadas en tiempo real. El costo total del hardware prototipo fue inferior a $50 USD, lo que lo posiciona

como una alternativa económicamente viable frente a dispositivos comerciales. El proyecto contribuye al campo del IoT aplicado a la salud ambiental y se alinea con los ODS 3 y ODS 11 de las Naciones Unidas.

**Palabras clave**

Calidad del aire, IoT, ESP32, sensores MQ, inteligencia artificial, mascotas, salud ambiental.

## Introducción

La calidad del aire en espacios interiores representa un factor determinante para la salud y el bienestar de los seres humanos y sus animales de compañía. Según la EPA (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 24 de julio de 2025), las personas pasan aproximadamente el 90% de su tiempo en ambientes cerrados, donde la concentración de contaminantes puede ser hasta cinco veces superior a la del aire exterior. Entre los principales contaminantes presentes en estos ambientes se encuentran el monóxido de carbono (CO), el metano ($CH_4$) y diversos compuestos orgánicos volátiles (COVs), cuya exposición prolongada puede derivar en problemas respiratorios, cardiovasculares y neurológicos tanto en humanos como en mascotas (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 24 de julio de 2025)

A pesar de la gravedad de esta problemática, los sistemas tradicionales de monitoreo de calidad del aire presentan limitaciones significativas en términos de accesibilidad económica, facilidad de uso y capacidad de proporcionar información en tiempo real a los usuarios (Co, 2020). La mayoría de los dispositivos comerciales disponibles se enfocan exclusivamente en la medición de parámetros aislados, sin ofrecer una visión integral de la calidad del aire ni capacidades predictivas que permitan anticipar situaciones de riesgo (Easterline, Ravica Putri, Atmaja, Lingga Dewi, & Prasetyo, 2024). Adicionalmente, estos sistemas carecen de personalización para considerar las necesidades específicas de hogares con mascotas, donde factores como la ubicación de los animales y los patrones de comportamiento pueden influir significativamente en la distribución de contaminantes.

En este contexto, el desarrollo tecnológico basado en el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial ha abierto nuevas posibilidades para el diseño de sistemas de monitoreo ambiental más accesibles, precisos e inteligentes ( L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah, 2022). La integración de sensores de bajo costo con microcontroladores de alto rendimiento y plataformas móviles permite crear soluciones personalizadas que no solo detectan contaminantes en tiempo real, sino que también analizan patrones de comportamiento y generan recomendaciones predictivas para mejorar la calidad del aire de manera proactiva ( L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah, 2022).

El presente trabajo de grado propone el diseño e implementación de un sistema inteligente de monitoreo de calidad del aire para espacios interiores, orientado específicamente al bienestar de humanos y mascotas. Este sistema integra hardware basado en el microcontrolador ESP32 y sensores de la serie MQ (MQ4, MQ7 y MQ135) para la detección de metano, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, respectivamente (Shengjia Jin, y otros, 16 de mayo de 2023). La información capturada es transmitida en tiempo real a una aplicación móvil desarrollada para Android, que permite visualizar los niveles de contaminación, recibir notificaciones ante situaciones críticas y acceder a recomendaciones personalizadas. Adicionalmente, se incorpora un módulo de inteligencia artificial que analiza patrones de contaminación en función de variables temporales y ambientales, proporcionando sugerencias predictivas sobre ventilación, ubicación óptima de mascotas y posibles fuentes de contaminación

doméstica ( L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah, 2022). Con esta propuesta se busca contribuir a la mejora de la salud y calidad de vida de las personas y sus animales de compañía, promoviendo la conciencia ambiental mediante tecnologías emergentes accesibles y fáciles de implementar.

## Marco teórico

### Calidad del aire interior

La calidad del aire interior (CAI) es fundamental para la salud de las personas y sus mascotas, quienes comparten los mismos espacios domésticos. Se estima que pasamos aproximadamente el 90 % del tiempo en interiores, donde la concentración de contaminantes puede ser igual o mayor que en el exterior, afectando especialmente a niños, adultos mayores y personas con problemas respiratorios (Agency., 2025 abril 9); (Agency, 2025, Octubre 14)

Entre los principales riesgos se encuentran los compuestos químicos liberados por productos de limpieza, que pueden afectar la salud respiratoria de humanos y animales domésticos ( Iriarte, Álvarez, & Rodríguez). Otros factores como polvo, moho, monóxido de carbono y emisiones de aparatos de combustión se agravan por una ventilación insuficiente (Agency., 2025 abril 9).

Para proteger la salud de todos los miembros del hogar, se recomienda ventilar los espacios, usar filtros de aire de alta eficiencia, controlar la humedad interior y optar por productos de limpieza menos tóxicos ( Iriarte, Álvarez, & Rodríguez); (Agency, 2025,

Octubre 14). La adopción de estas medidas crea un entorno más seguro y saludable, tanto para humanos como para sus mascotas, quienes cada vez ocupan un lugar más importante en la vida familiar.

## Principales Contaminantes en Espacios Cerrados

Los contaminantes del aire interior se clasifican según su naturaleza química y física en gases, vapores, partículas y compuestos biológicos. Para efectos de este proyecto, se priorizan tres categorías de contaminantes gaseosos cuya presencia y concentración pueden medirse mediante sensores semiconductores de bajo costo: monóxido de carbono, metano y compuestos orgánicos volátiles.

### Monóxido de carbono

Es un gas incoloro, inodoro y no irritante, producto de la combustión incompleta de hidrocarburos en estufas, calefactores, braseros o motores de combustión. Debido a su capacidad para atravesar con facilidad los alvéolos pulmonares y su alta afinidad por la hemoglobina —aproximadamente 230 veces mayor que la del oxígeno—, el CO forma carboxihemoglobina (COHb), reduciendo la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre y ocasionando hipoxia tisular (Galán Gil, Romero Cereño, & Cordero Torres, 2023). Este proceso puede provocar síntomas iniciales inespecíficos como cefalea, náuseas, mareo o debilidad, y en casos graves derivar en pérdida de conciencia, daño neurológico o muerte.

La intoxicación por CO constituye un problema sanitario frecuente en el ámbito doméstico: según la Fundación Española de Toxicología Clínica, más del 90 % de los casos reportados son de origen residencial (Galán Gil et al., 2023). Esta realidad pone de relieve la importancia de monitorear continuamente la calidad del aire en interiores mediante sistemas tecnológicos que permitan la detección temprana de gases peligrosos y la emisión de alertas preventivas, especialmente en entornos donde conviven personas y mascotas, ya que ambos son susceptibles a los efectos hipóxicos del CO.

**Metano ($CH_4$ )**

Es un gas inodoro e incoloro que se filtra frecuentemente en ambientes residenciales a través de fugas de gas natural o combustión incompleta. Estudios han encontrado concentraciones interiores de metano con medianas de aproximadamente 2.6 ppm, lo que indica que, aunque por debajo de los umbrales de explosión, las emisiones persistentes de $CH_4$ en interiores son comunes (Merrin & Francisco, 2019 marzo 25). Además, el metano es altamente inflamable: cuando se acumula en concentraciones del orden del 5 % al 15 % (50 000 a 150 000 ppm) representa un riesgo de explosión o desplazamiento de oxígeno, lo que puede generar hipoxia en ocupantes humanos o animales (Kumar & Gupta, 2021). De igual modo, análisis en hogares americanos mostraron que más del 75 % de las emisiones de $CH_4$ provinieron de periodos en que los aparatos estaban apagados, lo cual evidencia que las fugas residuales constituyen una fuente significativa de contaminación interior (Lebel, Finnegan, Ouyang, & Jackson, 27 de enero de 2022)

**Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)**

Constituyen una amplia variedad de sustancias químicas que se vaporizan a temperatura ambiente. En los espacios interiores, estos contaminantes provienen de pinturas, barnices, productos de limpieza, ambientadores y materiales de construcción, entre otros. Según la  (U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 24 de julio de 2025), las concentraciones de muchos COVs en interiores pueden ser hasta diez veces mayores que en el aire exterior (EPA, s. f.).

Además, los COVs han sido asociados con efectos agudos y crónicos en la salud humana: irritación de ojos, nariz y garganta, dolores de cabeza, náuseas, enfermedades respiratorias como el asma o EPOC, e incluso se sospecha de la presencia de efectos carcinogénicos (Shengjia Jin, y otros, 16 de mayo de 2023). Algunos de estos compuestos como el benceno y otros,  están clasificados como probables o conocidos carcinógenos, y se han documentado efectos sobre hígado, riñón y sistema nervioso central

Dado que los animales domésticos respiran el mismo aire interior y a menudo permanecen cerca del suelo, donde pueden concentrarse residuos de COVs y polvo, es plausible que también presenten sensibilidad elevada ante estos compuestos, lo que refuerza la necesidad de implementar sistemas de monitoreo para proteger tanto a las personas como a sus mascotas.

## Impacto de la Calidad del Aire en la Salud de las Mascotas

Actualmente, los perros, los gatos y cualquier otro tipo de mascotas domésticas desempeñan un papel fundamental dentro de las familias, estando presentes en una gran cantidad de hogares como animales de compañía. Sin embargo, debido a su propia naturaleza y características físicas, estos animales pasan la mayor parte del tiempo muy cerca del suelo. Esta condición los vuelve mucho más vulnerables a inhalar gases nocivos y compuestos tóxicos que suelen acumularse en los pisos, especialmente cuando se manipulan distintos tipos de productos de limpieza doméstica (Ledit R. F. Ardusso, Hugo E. Neffen, Enrique Fernández-Caldas, & Ricardo J. Saranz, 2019). Al estar expuestos constantemente a ras de piso, respiran estas sustancias de forma directa, lo que suele desencadenar enfermedades y problemas respiratorios graves que, hoy en día, representan una de las causas más considerables de mortalidad en la medicina veterinaria actual.

## Sensores de Gas Semiconductor

Los sensores de gas semiconductor, también conocidos como sensores de óxido metálico (MOX o MOS), son ampliamente utilizados en aplicaciones de detección de gases debido a su bajo costo, tamaño compacto, buena sensibilidad y fácil integración en sistemas electrónicos. Estos dispositivos operan basándose en cambios en la conductividad eléctrica del material semiconductor, típicamente dióxido de estaño ($SnO_2$) u otros óxidos metálicos, cuando entran en contacto con gases reductores u oxidantes. En efecto, en sensores MOS tipo n, los gases reductores como el Monoxido de carbono (CO)

o el Metano ($CH_4$) donan electrones al semiconductor, incrementando el número de portadores de carga y provocando una reducción de la resistencia eléctrica, lo cual se traduce en señal de detección (Castañeda-Aviña, 2018)

Un aspecto crítico del funcionamiento de estos sensores es la temperatura de operación, ya que las reacciones superficiales de oxidación-reducción requieren calentamiento del material a valores típicos entre 200 °C y 450 °C mediante un elemento calefactor integrado, lo que es fundamental para garantizar mediciones estables y confiables.

**Serie MQ de Sensores**

Dentro de los sensores semiconductores más utilizados se encuentra la familia MQ, compuesta por diferentes modelos diseñados para responder ante distintos tipos de gases. Estos dispositivos utilizan materiales de óxido metálico, principalmente dióxido de estaño ($SnO_2$), cuya resistencia eléctrica cambia cuando interactúan con las moléculas presentes en el aire.

La serie MQ ha sido ampliamente implementada en proyectos académicos, sistemas de seguridad y soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT), debido a que permite obtener información del entorno mediante circuitos sencillos y de bajo costo. Además, su compatibilidad con microcontroladores facilita la creación de dispositivos capaces de capturar datos, procesarlos y generar alertas en tiempo real.

Sin embargo, estos sensores presentan una limitación importante relacionada con su selectividad. Un mismo sensor puede reaccionar ante diferentes gases, no solamente

frente al compuesto para el cual fue diseñado. Por esta razón, los datos obtenidos requieren procesos de calibración e interpretación para evitar lecturas erróneas y lograr una representación más confiable de la calidad del aire.

**Sensor MQ-4**

Está diseñado para la detección de metano ($CH_4$) y gas natural, mostrando alta sensibilidad en un rango de 200 a 10 000 ppm. Su elemento activo es una capa de dióxido de estaño depositada sobre un tubo cerámico de alúmina, cuya conductividad eléctrica aumenta con la concentración de metano en el ambiente (Hanwei Electronics, 2020). El dispositivo opera con un voltaje de calentamiento constante de 5 V, presenta un consumo de potencia menor a 750 mW, y requiere una resistencia de carga entre 10 kΩ y 47 kΩ para un funcionamiento óptimo. Además, aunque su respuesta es más intensa ante el metano, también muestra sensibilidad secundaria frente a gases combustibles como propano, butano, hidrógeno y monóxido de carbono, lo que puede generar interferencias en entornos mixtos (Hanwei Electronics, 2020). Gracias a su alta estabilidad, bajo costo y rápida respuesta, el MQ-4 se emplea ampliamente en sistemas de detección de fugas de gas tanto domésticos como industriales.




*Figura 1.* Sensor MQ4.

**Sensor MQ-7**

Para detección de CO El sensor MQ-7, fabricado por Hanwei Electronics Co., Ltd., es un dispositivo semiconductor diseñado específicamente para la detección de monóxido de carbono (CO) en concentraciones comprendidas entre 20 y 2000 ppm. Este sensor utiliza una capa sensible de dióxido de estaño ($SnO_2$) depositada sobre un tubo cerámico de alúmina ($Al_2O_3$), con un calentador interno de aleación Ni-Cr, que permite mantener las condiciones térmicas necesarias para la correcta operación del material sensible. Una de sus características distintivas es su ciclo térmico dual, compuesto por una fase de calentamiento alto a 5 V durante 60 segundos y una fase de bajo voltaje a 1.4 V durante 90 segundos, lo que mejora la selectividad y estabilidad de las mediciones de CO frente a otros gases como $H_2$, metano o propano. El sensor presenta una vida útil promedio de cinco años, requiere un tiempo de precalentamiento de al menos 48 horas y una

resistencia de carga (RL) ajustable entre 5 kΩ y 47 kΩ, recomendándose 10 kΩ para aplicaciones estándar (Hanwei Electronics Co., 2020).




*Figura 2.* Sensor MQ7.

**Sensor MQ-135**

Es un detector de amplio espectro diseñado para monitorear la presencia de diversos compuestos orgánicos volátiles y contaminantes del aire, incluyendo amoniaco ($NH_3$), benceno, alcohol, humo y dióxido de carbono ($CO_2$) (Co, 2020). Su rango de detección abarca desde 10 hasta 1.000 ppm para la mayoría de los gases objetivo, permitiendo evaluar de manera general la calidad del aire en entornos residenciales, comerciales o

industriales. Este sensor utiliza una capa sensible de dióxido de estaño ($SnO_2$) sobre un tubo cerámico de alúmina ($Al_2O_3$) y opera con un voltaje de calentamiento constante de 5 V, presentando un tiempo de respuesta aproximado de 20-30 segundos (Hanwei Electronics, 2020). Dado que el MQ-135 es sensible a múltiples gases simultáneamente, su señal representa una combinación de las contribuciones de cada gas presente, lo que lo hace ideal para monitoreo general de la calidad del aire, aunque no permite la identificación específica de cada gas sin procesamiento adicional de señales o calibración con dispositivos de referencia (Hanwei Electronics, 2020). La calibración requiere típicamente exposición a atmósferas de referencia bien caracterizadas, considerando los efectos de temperatura y humedad sobre la resistencia de salida del sensor.




*Figura 3.* Sensor MQ135.

**Internet de las Cosas (IoT) Aplicado al Monitoreo Ambiental**

El Internet de las Cosas (IoT) permite la interconexión de dispositivos físicos equipados con sensores, actuadores y módulos de comunicación, facilitando la recolección, transmisión y procesamiento de datos sin intervención humana directa. En el contexto de este proyecto, los sensores de gases MQ-4, MQ-7 y MQ-135 se emplearán para monitorear de manera continua la concentración de metano, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, respectivamente. Los datos generados por los sensores son adquiridos y procesados por un microcontrolador ESP32, que los transmite a una base de datos en la nube mediante Firebase, garantizando almacenamiento en tiempo real y acceso remoto.

La arquitectura del sistema se organiza en cuatro capas: (1) capa de percepción, integrada por los sensores MQ y el ESP32; (2) capa de red, que utiliza Wi-Fi para la comunicación con la nube; (3) capa de procesamiento y almacenamiento, basada en Firebase, que permite análisis, almacenamiento histórico y generación de alertas; y (4) capa de aplicación, representada por una app móvil desarrollada en Flutter, donde los usuarios pueden visualizar datos en tiempo real, consultar tendencias y recibir notificaciones automáticas ante la detección de gases peligrosos

**Microcontrolador ESP32**

El microcontrolador ESP32, desarrollado por Espressif Systems, se ha convertido en una opción ampliamente adoptada para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) gracias a su bajo costo, alto rendimiento y conectividad integrada. Este sistema en-chip (SoC) incluye un procesador dual-core de 32 bits con frecuencias de hasta 240 MHz, conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n y Bluetooth 4.2/BLE, múltiples interfaces de comunicación (UART, SPI, $I^2C$) y conversores analógico-digitales de 12 bits, lo que lo hace especialmente adecuado para sistemas de adquisición y transmisión de datos en tiempo real. En el contexto de monitoreo ambiental con sensores como los de la serie MQ, el ESP32 permite conectar múltiples sensores analógicos directamente, realizar tareas de adquisición y procesamiento local sin comprometer la latencia, y transmitir los datos a la nube o a una base de datos como Firebase para su visualización en una aplicación móvil desarrollada en Flutter.

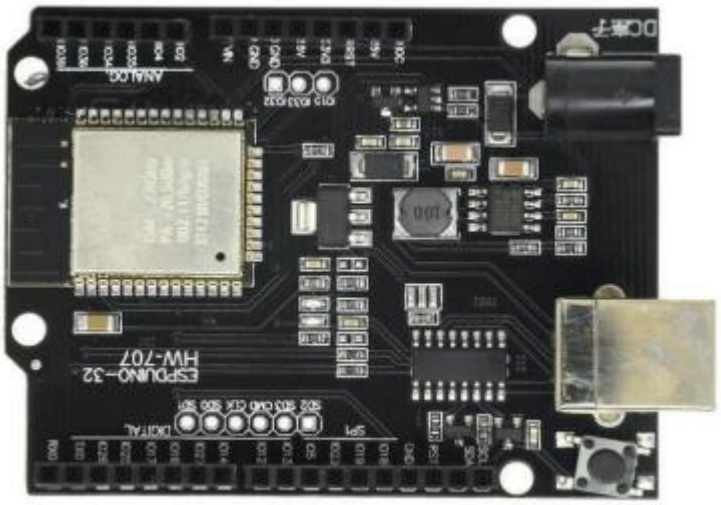



*Figura 4.* Microcontrolador ESP32.

**Antecedentes y estado del arte**

El desarrollo de sistemas de monitoreo de calidad del aire mediante tecnologías IoT ha experimentado un crecimiento sostenido en los últimos años, impulsado por la reducción de costos de los sensores semiconductores y la disponibilidad de plataformas de computación en la nube. A continuación, se detallan los antecedentes más relevantes que contextualizan y justifican el presente proyecto.

**Proyectos de monitoreo IoT con sensores MQ y ESP32**

Uno de los trabajos más cercanos al presente proyecto es el desarrollado por (Easterline, Ravica Putri, Atmaja, Lingga Dewi, & Prasetyo, 2024), titulado *Smart Air Monitoring with IoT-based MQ-2, MQ-7, MQ-8, and MQ-135 Sensors using NodeMCU ESP32*. En este trabajo, los autores construyeron un prototipo de monitoreo de calidad del aire utilizando sensores de la familia MQ para detectar gases , integrados sobre un

microcontrolador ESP32 con conexión Wi-Fi. Los datos capturados se transmiten a una plataforma IoT en la nube donde pueden visualizarse remotamente.

Este antecedente resulta relevante para BioSenseIoT porque comparte una arquitectura tecnológica similar. En ambos casos se emplean sensores de bajo costo, un ESP32 como unidad encargada del procesamiento y comunicación, y un servicio externo para almacenar o visualizar la información obtenida. Los resultados presentados por (Easterline, Ravica Putri, Atmaja, Lingga Dewi, & Prasetyo, 2024) muestran que este tipo de configuración puede utilizarse como una alternativa viable para supervisar concentraciones de gases en tiempo real, respaldando la selección de estos componentes dentro del presente proyecto.

No obstante, existen diferencias sustanciales. El sistema de (Easterline, Ravica Putri, Atmaja, Lingga Dewi, & Prasetyo, 2024), está orientado al monitoreo general de calidad del aire sin distinción del contexto donde opera: no contempla espacios residenciales, no incorpora lógica de alertas por niveles de riesgo, no cuenta con aplicación móvil propia y, sobre todo, no considera la presencia de mascotas como variable relevante para la interpretación de los datos. BioSense IoT, en cambio, parte de la premisa de que un hogar con animales de compañía representa un escenario particular donde la calidad del aire afecta de forma diferenciada a sus ocupantes, y construye sobre esa premisa tanto la lógica de alertas como el módulo de recomendaciones basado en inteligencia artificial.

Bajo este mismo concepto, pero desde un enfoque más orientado a la inteligencia aplicada, ( L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah, 2022) desarrollaron un

sistema, donde una red de sensores IoT recopila datos de contaminantes junto con variables de temperatura y humedad, enviándolos a un servidor en la nube para su análisis. Lo que distingue este trabajo de los demás antecedentes es la incorporación de modelos de inteligencia artificial para ir más allá de la simple medición: el sistema genera predicciones sobre el comportamiento futuro de los contaminantes y activa alertas cuando los niveles detectados representan un riesgo real. Este principio, pasa de la detección reactiva a la anticipación, es el mismo que fundamenta el módulo de recomendaciones de BioSense IoT. Sin embargo, el sistema de ( L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah, 2022), su enfoque es ambiental pensado para contaminantes de la salud pública y como lo había mencionado en el anterior proyecto la diferencia es que no considera los hogares modernos donde las mascotas hacen parte.

La siguiente tabla sintetiza la comparación:

*Tabla 1.*Comparación entre proyectos.

| **Característica** | **Easterline. (2024)** | **Natrayan (2022)** | **BioSense IoT** |
|---|---|---|---|
| **Sensores MQ** | ✓ | Parcial | MQ-4, MQ-7, MQ-135 |
| **ESP32** | ✓ | No especifica | ✓ |
| **App móvil nativa** | ✗ | ✗ | ✓ Capacitor/Android |
| **Firebase en tiempo real** | ✗ | ✗ | ✓ |
| **IA / recomendaciones** | ✗ | Modelo propio | ✓ Gemini API |
| **Perfil de mascotas** | ✗ | ✗ | ✓ |
| **Clasificación de riesgo** | ✗ | ✓ | ✓ 3 niveles |

## Planteamiento del problema.

La calidad del aire dentro de los espacios cerrados se ha convertido en un tema de interés debido a la relación que existe entre la exposición constante a ciertos contaminantes y sus efectos sobre la salud. Aunque muchas veces se presta más atención al aire exterior, las viviendas y otros ambientes interiores pueden acumular sustancias perjudiciales provenientes de procesos cotidianos como la combustión, el uso de productos de limpieza o una ventilación insuficiente.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), millones de personas están expuestas diariamente a contaminantes presentes en espacios cerrados, situación que se relaciona con diferentes afectaciones respiratorias y problemas de salud a largo plazo. Esta situación adquiere una dimensión particular en hogares donde conviven personas y animales de compañía, debido a que las mascotas permanecen gran parte del tiempo dentro de estos ambientes y pueden presentar una respuesta diferente frente a determinados contaminantes. Factores como su tamaño corporal, frecuencia respiratoria y cercanía al suelo pueden aumentar su exposición a gases como el monóxido de carbono (CO), metano ($CH_4$) y compuestos orgánicos volátiles (COV).

A pesar de la existencia de dispositivos comerciales para medir la calidad del aire, todavía existe una limitación importante relacionada con el acceso y la adaptación de estas soluciones al contexto doméstico. Muchos equipos disponibles en el mercado tienen costos elevados para usuarios promedio y, además, suelen estar enfocados en entregar mediciones generales sin considerar las características particulares de cada vivienda.

Aspectos como la presencia de mascotas, los hábitos de limpieza, las fuentes internas de contaminación y las condiciones de ventilación influyen directamente en el comportamiento del aire dentro del hogar.

Otro punto que presenta una oportunidad de mejora es la forma en que actualmente se interpretan los datos ambientales. La mayoría de sistemas convencionales se enfocan en mostrar valores instantáneos de concentración de gases o generar alertas cuando un límite es superado. Sin embargo, esta información por sí sola no siempre permite comprender qué está ocurriendo ni qué acciones pueden realizarse para reducir el riesgo. Hace falta avanzar hacia soluciones capaces de analizar los datos obtenidos, identificar comportamientos repetitivos y entregar recomendaciones que ayuden al usuario a actuar antes de que la situación represente un problema mayor.

Desde el ámbito tecnológico existen herramientas que facilitan la creación de sistemas de monitoreo más accesibles, como sensores de bajo costo, microcontroladores con conectividad inalámbrica y plataformas digitales para almacenamiento y análisis de información. Aun así, continúa siendo necesario integrar estos elementos en soluciones completas que combinen adquisición de datos, comunicación en tiempo real, interpretación inteligente y una interfaz sencilla para el usuario.

En este contexto surge la necesidad de desarrollar BioSenseIoT, un sistema orientado al monitoreo de la calidad del aire en interiores que permita detectar la presencia de gases contaminantes mediante sensores conectados a una plataforma IoT. La propuesta busca no solo registrar las condiciones ambientales, sino también generar alertas y

recomendaciones enfocadas en espacios donde conviven personas y mascotas, aportando una alternativa tecnológica más accesible y adaptada a las necesidades del hogar.

## Justificación

Este proyecto nace a partir de una necesidad concreta: contar con una herramienta que permita conocer qué está ocurriendo con el aire dentro de un hogar sin depender de equipos costosos o soluciones difíciles de implementar. Aunque actualmente existen dispositivos comerciales capaces de detectar contaminantes, muchas de estas alternativas no están pensadas para usuarios comunes ni consideran situaciones específicas como aquellos espacios donde conviven personas y animales de compañía.

BioSenseIoT plantea una solución basada en la integración de sensores de bajo costo (MQ-4, MQ-7 y MQ-135), un microcontrolador ESP32 con conexión IoT, una aplicación móvil para dispositivos Android y un módulo de inteligencia artificial encargado de analizar la información obtenida. Más allá de registrar la presencia de ciertos gases, el sistema busca convertir esos datos en información práctica mediante alertas y recomendaciones que permitan al usuario tomar acciones frente a cambios desfavorables en el ambiente.

La importancia del proyecto también se relaciona con la prevención. Un cambio en la calidad del aire puede pasar desapercibido hasta que genera molestias o representa un riesgo, especialmente cuando la exposición ocurre durante largos periodos dentro de espacios cerrados. Al ofrecer monitoreo en tiempo real, BioSenseIoT permite que los

usuarios identifiquen situaciones como acumulación de gases, problemas de ventilación o condiciones que puedan afectar el bienestar de quienes habitan la vivienda, incluyendo sus mascotas.

Desde el punto de vista tecnológico, la propuesta combina diferentes áreas que actualmente tienen un papel importante en el desarrollo de soluciones inteligentes: sensores electrónicos, sistemas embebidos, comunicación inalámbrica, aplicaciones móviles y análisis automatizado de datos. La integración de estos elementos permite construir una plataforma orientada al monitoreo ambiental residencial, aprovechando tecnologías disponibles y de fácil acceso.

Además, el desarrollo de BioSenseIoT puede servir como referencia para futuros proyectos enfocados en hogares inteligentes, monitoreo ambiental y bienestar animal. La propuesta busca demostrar que es posible aplicar tecnologías IoT e inteligencia artificial para atender problemas cotidianos mediante herramientas accesibles. De igual manera, guarda relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 3 (Salud y Bienestar) y el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), al promover ambientes interiores más seguros y conscientes.

# Objetivos

## Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo inteligente de la calidad del aire en espacios interiores mediante la integración de sensores de gases, microcontrolador ESP32, aplicación móvil Android e inteligencia artificial, para contribuir al bienestar de humanos y mascotas a través de la detección en tiempo real de contaminantes y la generación de recomendaciones predictivas personalizadas.

## Objetivos específicos

- Caracterizar y calibrar, en la fase inicial del proyecto, los sensores MQ4, MQ7 y MQ135 para medir $CH_4$, CO y COVs con un margen de error inferior al 10%, estableciendo umbrales de alerta conforme a las normas internacionales de calidad del aire.
- Desarrollar, durante la segunda fase del proyecto, el sistema de adquisición de datos basado en ESP32, con protocolos Wi-Fi que aseguren una transmisión de mediciones en tiempo real con una latencia inferior a 2 segundos hacia la aplicación móvil.
- Diseñar e implementar, durante la tercera fase del proyecto, una aplicación móvil Android que permita visualizar niveles de contaminación, configurar umbrales y recibir notificaciones instantáneas ante eventos críticos.
- Desarrollar, en la cuarta fase del proyecto, un módulo de inteligencia artificial capaz de identificar patrones de contaminación con al menos un 80% de precisión y generar recomendaciones predictivas personalizadas sobre ventilación y ubicación de mascotas.

- Validar, en la fase final del proyecto, el desempeño integral del sistema mediante pruebas en entornos reales, comparando las lecturas con valores de referencia y midiendo la efectividad de alertas y recomendaciones.

# Metodología

## Tipo y enfoque investigativo

El desarrollo de BioSenseIoT se plantea desde un enfoque aplicado y tecnológico, debido a que el objetivo principal del proyecto fue diseñar e implementar una solución capaz de monitorear la calidad del aire en espacios interiores mediante la integración de sensores, conectividad IoT, almacenamiento en la nube e inteligencia artificial.

El proyecto se llevó a cabo mediante una metodología de desarrollo iterativa e incremental, permitiendo construir el sistema por etapas y verificar el funcionamiento de cada componente antes de realizar la integración completa. Esta forma de trabajo facilitó la incorporación progresiva del hardware, la comunicación entre dispositivos, la gestión de datos y las interfaces utilizadas por el usuario. Además, permitió detectar fallas durante el proceso y realizar ajustes conforme evolucionaba la implementación.

Desde el área de ingeniería de software, la construcción de la solución se basó en una arquitectura modular, donde cada elemento cumple una función específica dentro del sistema. Esta organización permitió separar procesos como la captura de datos ambientales, la transmisión de información, el almacenamiento en la nube, el análisis de condiciones de riesgo y la visualización de resultados. Gracias a esta distribución, el sistema puede mantenerse, modificarse o ampliarse con mayor facilidad en futuras versiones.

El proyecto también incorporó un componente experimental, ya que fue necesario comprobar el comportamiento real de los sensores y validar la comunicación entre los diferentes módulos. Para ello se realizaron pruebas enfocadas en la lectura de gases mediante sensores MQ, envío de información desde el ESP32, actualización de datos en tiempo real, generación de alertas y respuesta del módulo de inteligencia artificial encargado de entregar recomendaciones según las condiciones detectadas.

El proceso de desarrollo se organizó en varias fases. Inicialmente se realizó el análisis de requerimientos y la definición de la arquitectura general del sistema. Posteriormente se implementó el firmware encargado de adquirir los datos de los sensores, se configuró la conexión con Firebase como plataforma de almacenamiento y sincronización, se desarrolló la aplicación para la visualización de información y finalmente se integró el módulo de inteligencia artificial junto con las pruebas de funcionamiento del sistema completo.

Debido a que BioSenseIoT combina elementos físicos y digitales, como sensores, microcontroladores, servicios en la nube y aplicaciones de usuario, la metodología estuvo orientada a mantener una comunicación constante entre todas las partes del sistema. Esto permitió asegurar que los datos capturados por los sensores pudieran viajar correctamente desde el dispositivo hasta la plataforma de monitoreo, manteniendo una actualización continua de la información ambiental.

### Instrumentos de Validación

La validación del sistema se realizó mediante tres tipos de instrumentos: pruebas funcionales en escenarios controlados (exposición del sensor a gas encendedor para metano ($CH_4$), vela encendida para monóxido de carbono CO, y alcohol isopropílico para COVs); comparación de lecturas con valores de referencia documentados en las fichas técnicas de los sensores; y medición de la latencia de transmisión desde el ESP32 hasta la visualización en la aplicación.

### Análisis de requerimientos

El análisis de requerimientos permitió identificar las necesidades funcionales y técnicas necesarias para el desarrollo de BioSense IoT. El sistema debía ser capaz de capturar datos ambientales desde sensores físicos, transmitirlos en tiempo real hacia la nube y generar alertas comprensibles para el usuario mediante inteligencia artificial contextual.

Adicionalmente, se identificó la necesidad de mantener sincronización entre plataformas web y móvil, administrar dispositivos IoT asociados a usuarios autenticados y ofrecer recomendaciones orientadas a la protección de personas y mascotas frente a posibles riesgos ambientales.

Debido a la naturaleza distribuida del sistema, el análisis consideró tanto requerimientos de software como de integración de hardware, conectividad, almacenamiento en tiempo real y experiencia de usuario.

*Tabla 2.* Requisitos funcionales.

| Código | Requisito funcional |
|---|---|
| **RF-01** | El sistema debe permitir autenticación de usuarios mediante Firebase Autenticación. |
| **RF-02** | El sistema debe permitir vincular dispositivos ESP32 a un usuario autenticado. |
| **RF-03** | El ESP32 debe capturar lecturas de MQ-4, MQ-7 y MQ-135. |
| **RF-04** | El sistema debe transmitir telemetría en tiempo real hacia Firebase Realtime Database. |
| **RF-05** | La aplicación debe visualizar lecturas en tiempo real. |
| **RF-06** | El sistema debe generar alertas según el nivel de riesgo detectado. |
| **RF-07** | El sistema debe integrar Gemini para producir recomendaciones contextuales. |
| **RF-08** | El sistema debe almacenar información de mascotas y entorno. |
| **RF-09** | La aplicación debe funcionar en entorno web y Android. |
| **RF-10** | El sistema debe mantener historial local de alertas y recomendaciones. |

*Tabla 3.* Requisitos no funcionales.

| Código | Requisito no funcional |
|---|---|
| **RNF-01** | El sistema debe actualizar la información en tiempo real con baja latencia. |
| **RNF-02** | La interfaz debe ser compatible con navegadores modernos y Android. |
| **RNF-03** | El acceso a la información debe requerir autenticación de usuario. |
| **RNF-04** | El sistema debe mantener persistencia de sesión mediante Firebase Auth. |
| **RNF-05** | La arquitectura debe permitir escalabilidad mediante servicios cloud administrados. |
| **RNF-06** | La interfaz debe presentar alertas comprensibles para usuarios no técnicos. |
| **RNF-07** | El sistema debe mantener modularidad entre frontend, hardware y nube. |
| **RNF-08** | Las recomendaciones de IA deben generarse en tiempos adecuados para escenarios de monitoreo. |

**Caso de uso general**

Los casos de uso permiten representar las interacciones principales entre el usuario y el sistema BioSenseIoT. Estos diagramas describen las funcionalidades esenciales

relacionadas con autenticación, monitoreo ambiental, visualización de telemetría y generación de alertas inteligentes.

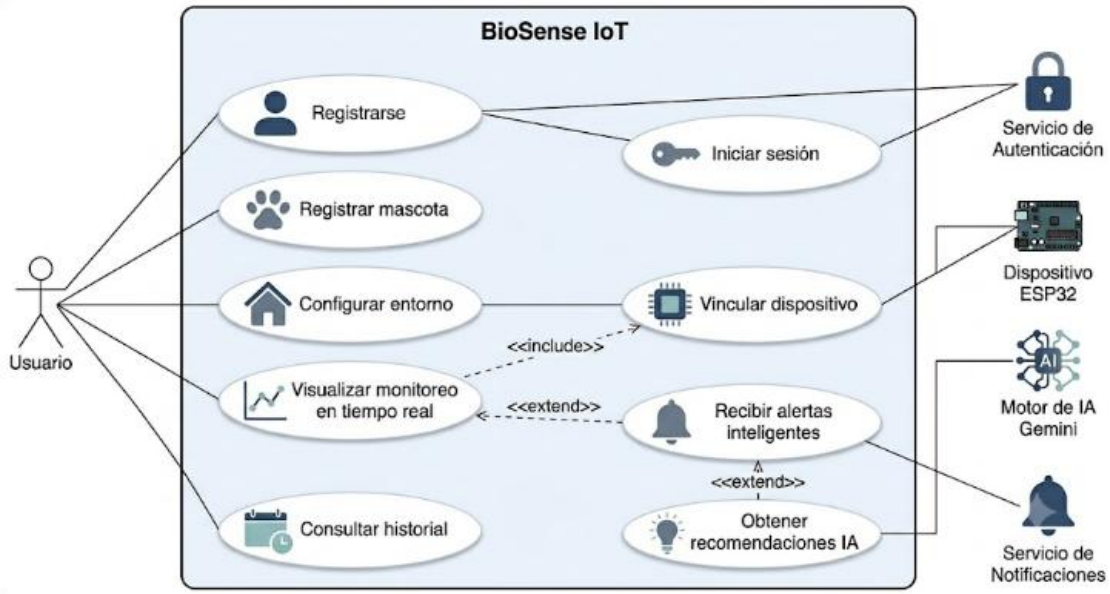



*Figura 5.* Diagrama general de casos de uso.

## Diseño de arquitectura

### Diagrama de arquitectura general.

A continuación, se observa la arquitectura general del sistema BioSense IoT, que se encuentra estructurada mediante un modelo arquitectónico de capas, lo cual permite visualizar cómo interactúan los sensores, la capa de procesamiento de datos, los servicios en la nube y la aplicación móvil y web.

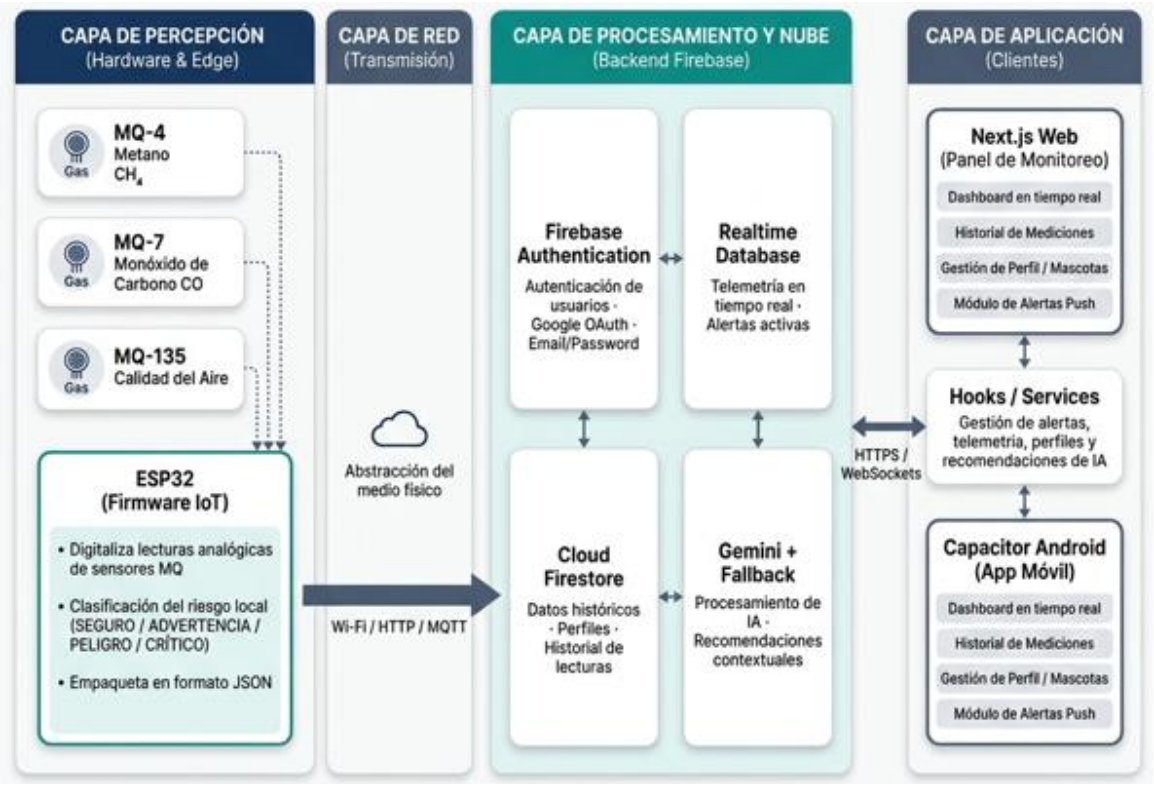



*Figura 6.* Diagrama de arquitectura general.

**Descripción de las Capas**

*Tabla 4.* Descripción de la arquitectura general del sistema.

| capa | Descripción |
|---|---|
| Capa de Percepción | Los sensores de gas MQ (MQ-4, MQ-7, MQ-135) capturan señales analógicas del entorno. El microcontrolador ESP32 digitaliza estas lecturas, aplica clasificación de riesgo y las empaqueta en formato JSON para transmisión. |

| | |
|---|---|
| Capa de Red y Transmisión | El ESP32 transmite los datos mediante Wi-Fi utilizando protocolos MQTT o HTTPS hacia la infraestructura en la nube. Esta capa abstrae el medio físico de comunicación. |
| Capa de Procesamiento y Nube | **Firebase** actúa como backend:<br>**Realtime Database**: almacena telemetría en vivo y estado de dispositivos<br>**Cloud Firestore**: persiste datos históricos, perfiles de usuario, de mascotas y de entorno<br>**Firebase Auth**: gestión autenticación (Google OAuth, Email/Password)<br>**Gemini API**: motor de IA externo que genera recomendaciones contextuales basadas en lecturas y perfiles |
| Capa de Aplicación y Presentación | **Next.js Web**: panel de monitoreo accesible desde navegador<br>**Capacitor Android/iOS**: aplicación móvil nativa con las mismas funcionalidades<br>Ambos clientes consumen datos en tiempo real y muestran: dashboard, historial, gestión de perfil/mascotas y alertas |

**Diagrama de componentes**

Aquí se detallan los componentes del sistema BioSenseIoT y la relación entre cada uno de ellos, mostrando cómo funcionan los módulos de hardware y software encargados de adquirir, procesar, almacenar y visualizar toda la información.

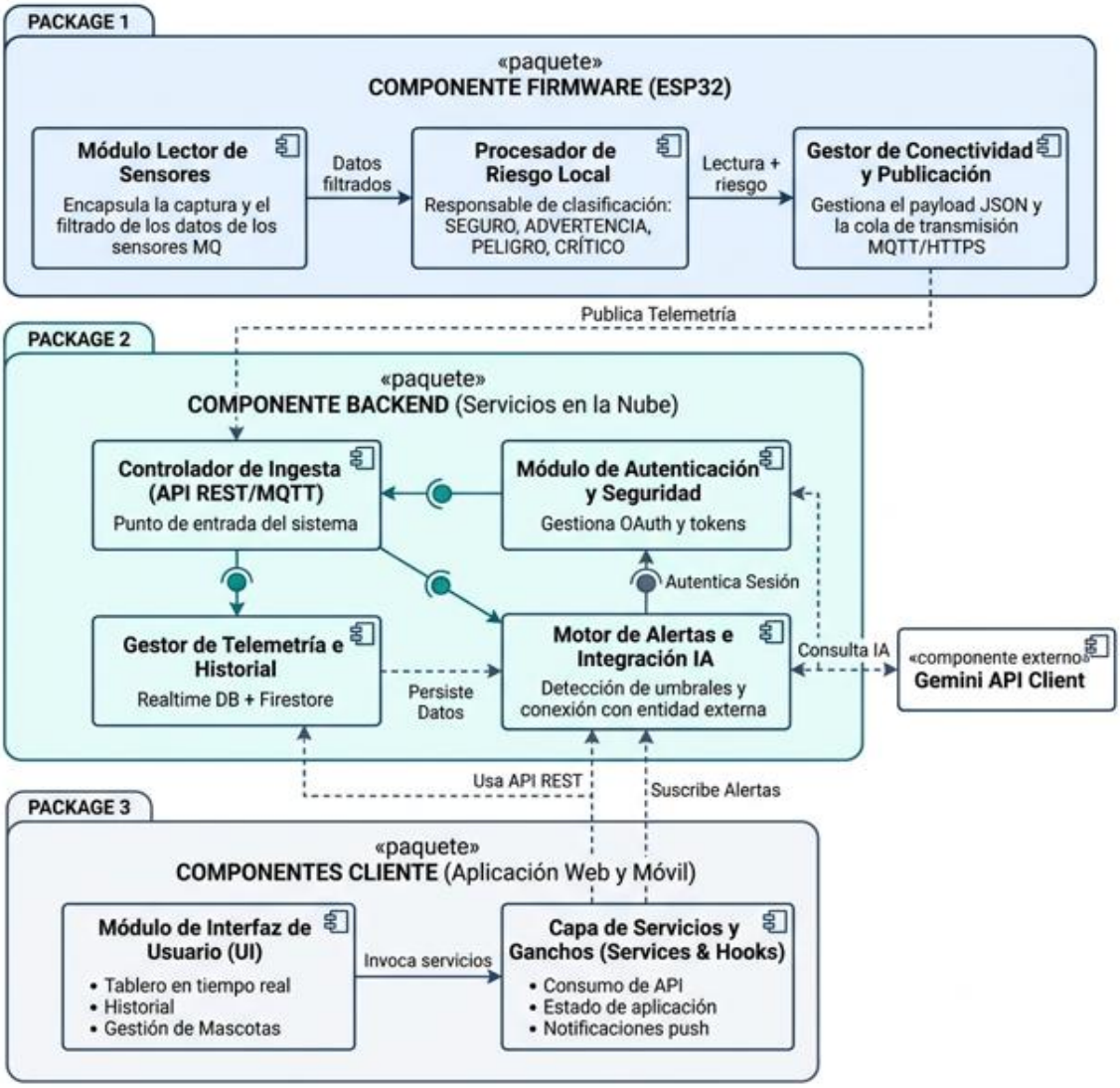



*Figura 7.* Diagrama de componentes.

**Descripción de Componentes**

*Tabla 5.* Descripción de Componentes.

| **«paquete» Componente Firmware — ESP32** | |
|---|---|
| Componente | Responsabilidad |
| Módulo Lector de Sensores | Captura señales analógicas de los sensores MQ-4 (metano), MQ-7 (monóxido de carbono) y MQ-135 (calidad del aire). Aplica filtrado de ruido y calibración. |
| Procesador de Riesgo | Ejecuta lógica de clasificación, evalúa umbrales configurables para determinar el nivel de riesgo |
| Gestor de Conectividad y Publicación | Serializa las lecturas clasificadas en formato JSON y las encola para transmisión vía MQTT o HTTPS. Gestiona reconexión automática Wi-Fi. |
| **«paquete» Componente Backend — Servicios en la Nube** | |
| Componente | Responsabilidad |
| Controlador de Ingesta | Punto de entrada para la recepción de telemetría. Valida la estructura del JSON y enruta a los servicios de persistencia y alertas. |
| Módulo de Autenticación y Seguridad | Centraliza la autenticación mediante Firebase Auth (Google OAuth 2.0 y Email/Password). Gestiona tokens de sesión y aplica reglas de seguridad en las bases de datos. |

| | |
|---|---|
| Gestor de Telemetría e Historial | Persiste lecturas en tiempo real en Realtime Database y almacena datos históricos y perfiles contextuales en Cloud Firestore. |
| Motor de Alertas e Integración IA | Detecta superación de umbrales críticos, orquesta notificaciones push y coordina JSON hacia Gemini API para obtener recomendaciones enriquecidas con datos de mascotas y entorno. |
| **«paquete» Componentes Cliente — Aplicación Web y Móvil** | |
| **Módulo de Interfaz de Usuario** | Contiene las vistas reutilizables: Dashboard en tiempo real, Historial de Mediciones, Gestión de Perfil/Mascotas y Panel de Alertas. Compartido entre Next.js Web y Capacitor Android/iOS |

**Diagrama de despliegue**

Aquí, se describe la distribución física de los elementos del sistema BioSenseIoT, mostrando la ubicación de los nodos de ejecución, dispositivos electrónicos, servicios en la nube y medios de comunicación utilizados para el funcionamiento de la solución.

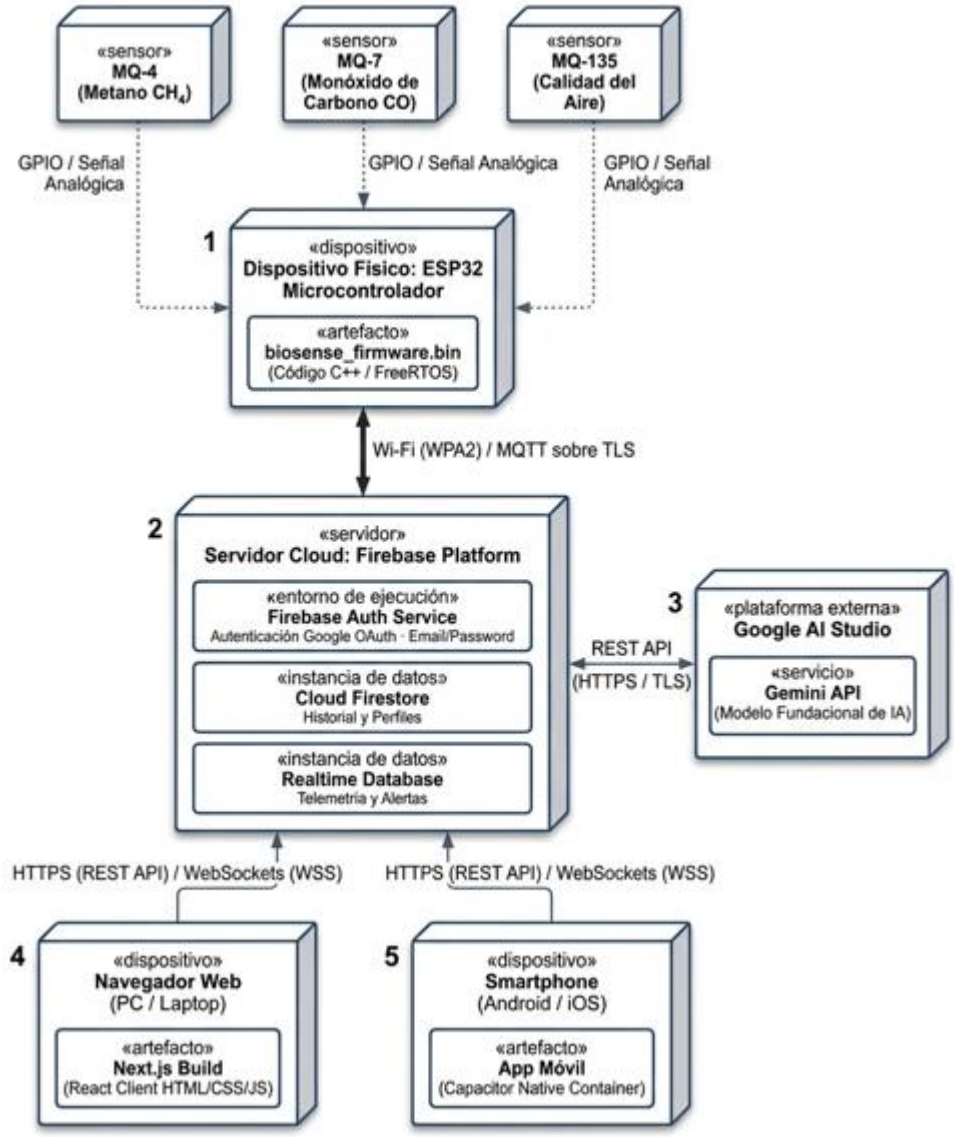



*Figura 8.* Diagrama de despliegue.

# Resultados y Discusión

## Implementación del prototipo BioSenseIoT

Como resultado del proceso de diseño e integración se logra obtener un prototipo funcional el cual está compuesto por los sensores ambientales de la serie MQ, un dispositivo IoT (microcontrolador ESP32), los servicios en la nube y la aplicación móvil y web para el monitoreo constante de la calidad del aire en ambientes controlados

## Funcionamiento del sistema

### Pantalla de inicio de sesión.

En la figura 9 se observa cómo se realiza un inicio de sesión; aquí hay dos mecanismos: ya sea con un registro, ingresando un correo y una contraseña válidos, o por medio de los servicios de Google. Para este servicio se utilizó Firebase Autenticación para gestionar de forma segura la identidad de los usuarios.

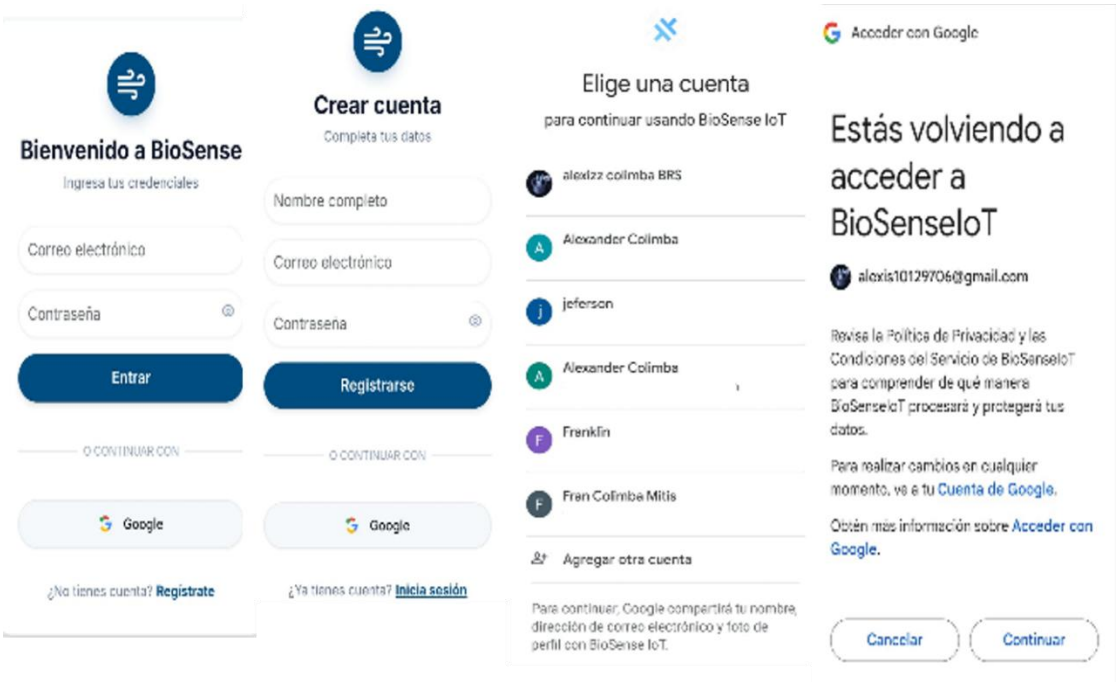



*Figura 9.* Inicio de sesión.

**Vinculación y sincronización del dispositivo IoT.**

El sistema BioSenseIoT permite realizar la sincronización entre el hardware y el software, la app móvil realiza una búsqueda del dispositivo activo mediante la comunicación inalámbrica Bluetooth Low Energy BLE, cuando se es detectado el dispositivo se obtiene su dirección única (MAC Address) y se utiliza como referencia para crear la asociación dentro de la aplicación móvil esta integración permite asociar un dispositivo a un usuario ya antes logueado garantizando que las mediciones ambientales generadas y procesadas por el esp32 sean enviadas y se puedan visualizar de forma óptima dentro del software correspondiente como se observa en la figura 10




*Figura 10.* Sincronización hardware y software.

**Configuración del entorno**

La configuración del entorno permite al usuario establecer las características del espacio donde se encuentra el dispositivo BioSenseIoT el cual proporciona la información que complementa las mediciones obtenidas de los sensores ambientales en esta sesión el usuario puede definir parámetros como por ejemplo el tipo de hogar nivel de ventilación que existe facilitando posteriormente el análisis y la generación de las alertas personalizadas

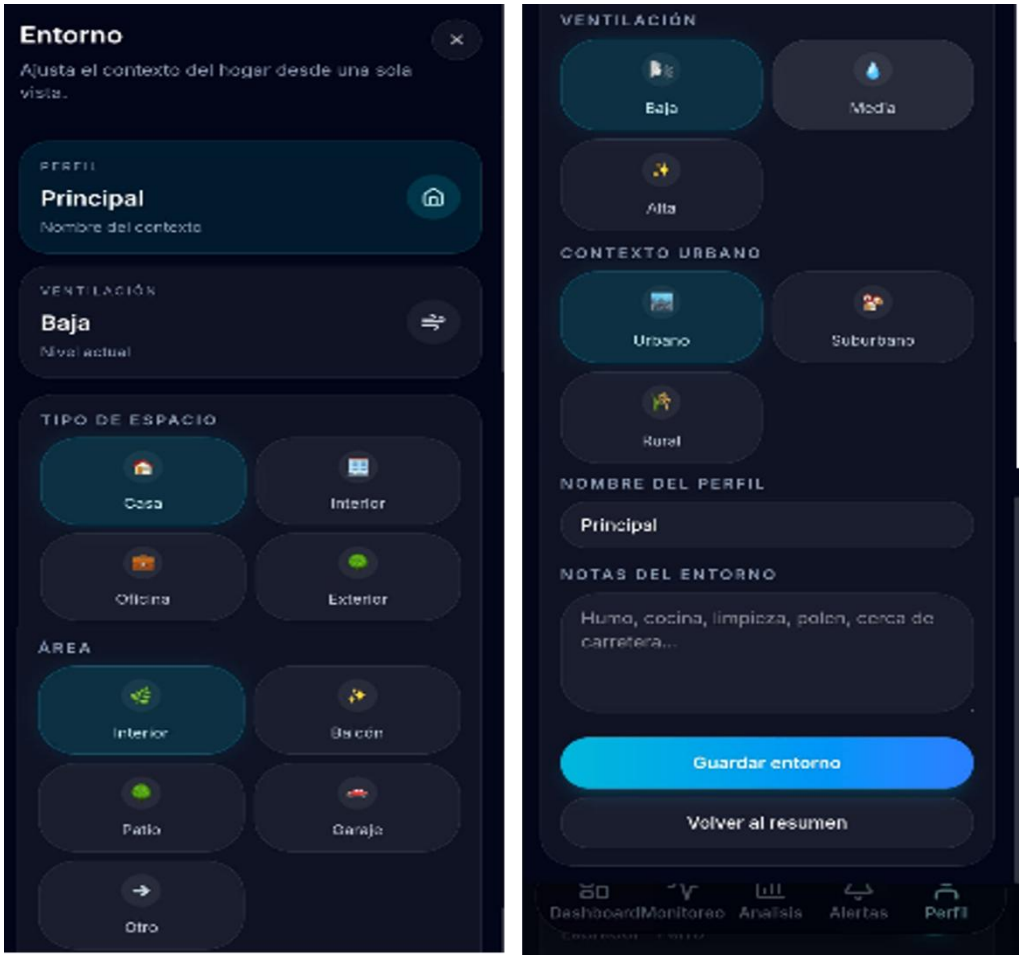



*Figura 11.* Configuración de entorno.

**Registro de mascota**

El sistema de BioSenseIoT está en pro de la salud de usuarios y mascotas por ende se hizo que el usuario pueda registrar sus mascotas y suministrar información relevante sobre ella tales como: Nombre, Raza, Edad, Peso, Condiciones especiales todo esto para que cuando se emita una alerta de peligro que ponga en riesgo la salud de su mascota registrada tenga unas recomendaciones de que hacer y mitigar la urgencia. En la figura 11 se observa el CRUD de registro de mascota.

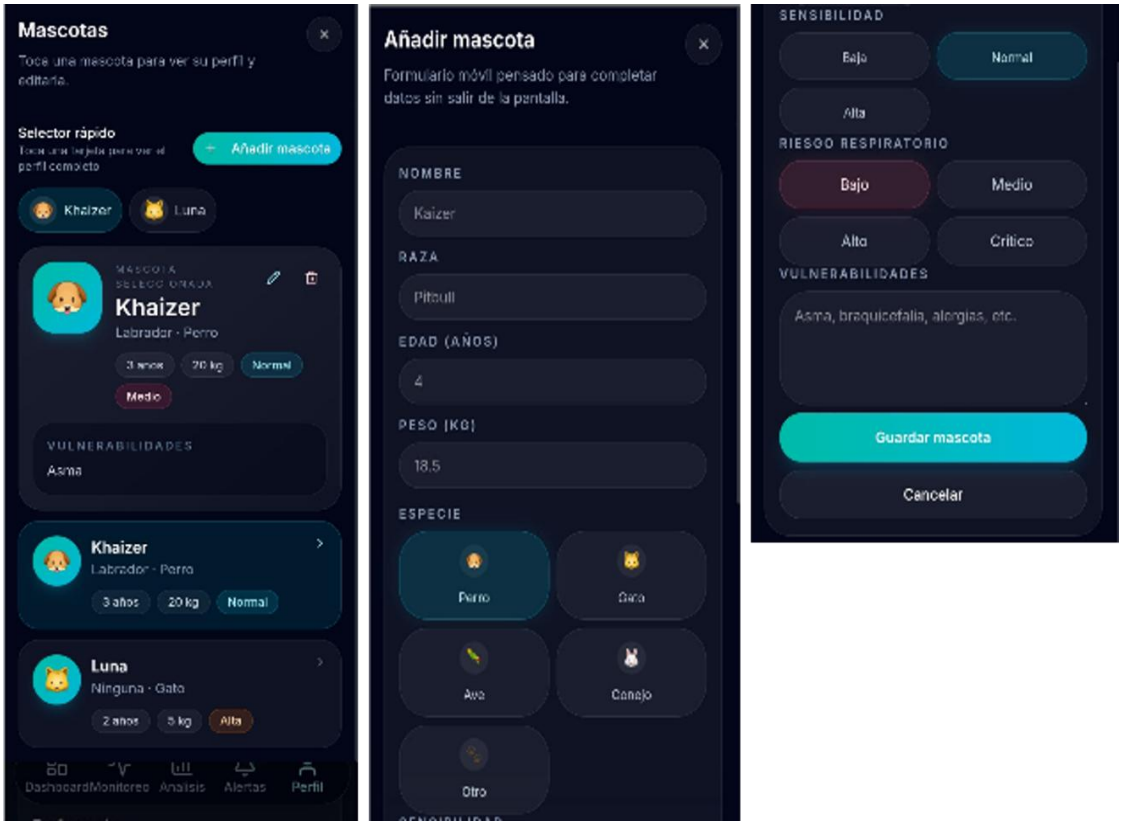



*Figura 12.* CRUD mascota.

**Gestión Perfil**

En esta sección de la aplicación se visualiza como se logró consolidar la vista de perfil en la aplicación móvil y web de BioSenseIoT. Esta interfaz agrupa sesiones como la configuración de entorno registro y visualización de mascotas la sincronización del dispositivo. Toda esta configuración permite que cuando se emita la alerta y si se tiene un entorno y mascotas se pueda procesar una recomendación basada en estos aspectos para cuidar la salud de las mascotas y como mitigar el fallo detectado .

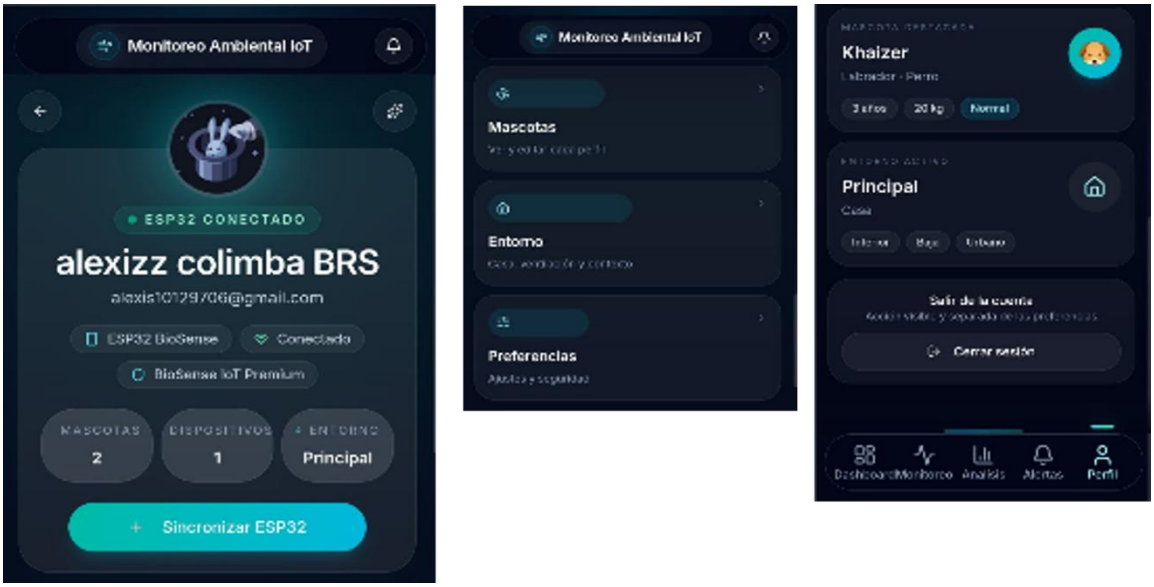



*Figura 13.* Gestión de perfil de usuario.

**Dashboard.**

Como resultado del panel principal del sistema para el monitoreo ambiental en tiempo real, en esta interfaz de logra visualizar la telemetría proveniente de la capa de percepción, traduciendo esas lecturas de los sensores en un índice de calidad del aire IAQ el cual fue cuantificado en un rango de 0 a 100 puntos se integran tarjetas para cada sensor que analiza distintos gases antes mencionados y medido en partículas por millón (PPM ) estos datos le permite al usuario la evaluación de si en espacio es habitable o está en peligro para la toma de decisiones preventivas en pro del cuidado de la salud respiratoria.

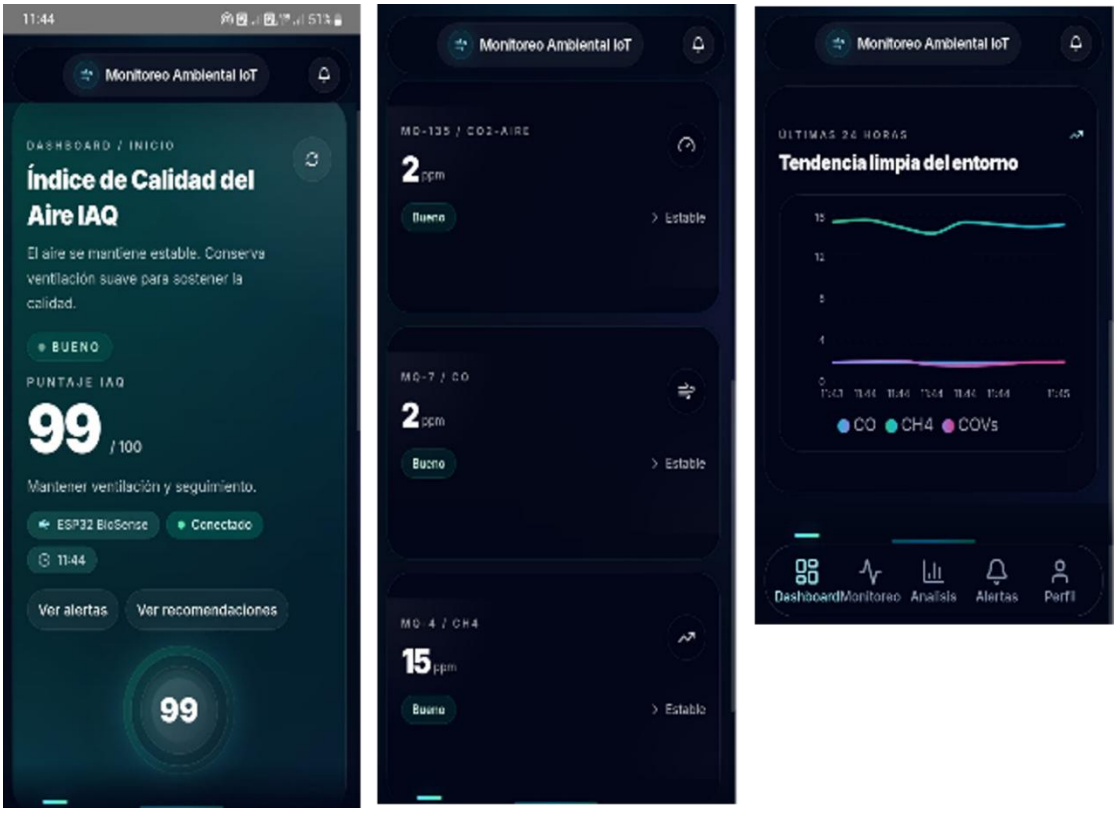



*Figura 14.* Vista Dashboard.

**Monitoreo**

Para el módulo de monitoreo, se visualizan de forma detallada los datos de telemetría recibidos desde el backend. Aquí se segmentan los datos recolectados por dispositivo para cada tipo de gas critico detectado (MQ-4 para Metano, MQ-7 para Monóxido de Carbono y MQ-135 para la Calidad General del Aire). Para cada sensor, se incorpora un gráfico para observar el comportamiento de cada uno.

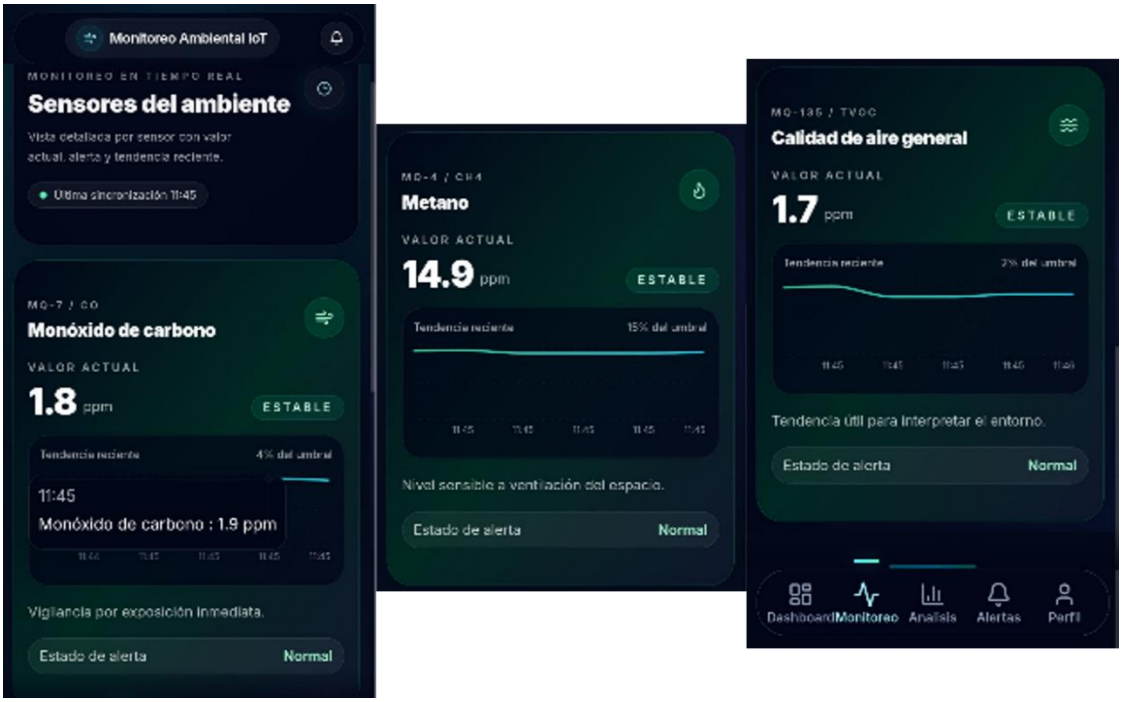



*Figura 15.* Vista monitoreo.

**Análisis**

En esta sesión del sistema de monitoreo de BioSenseIoT se usa para el desarrollo e implementación de una interfaz analítica y de exportación de datos. Aquí se consolidó la capa inteligente del sistema orientada al usuario para que él pueda realizar un filtrado del comportamiento, ya sea por semana, mes o incluso trimestral. El software procesa el comportamiento, calcula las métricas estadísticas consolidadas, como el promedio, los picos máximos registrados. Por otro lado, se tiene un subcomponente para la generación y exportación de reportes en formato PDF o CSV. Esta funcionalidad es importante para suministrarle al veterinario de cabecera analizar el comportamiento histórico del entorno doméstico y validar si las medidas tomadas cuando existe peligro tienen efectividad.

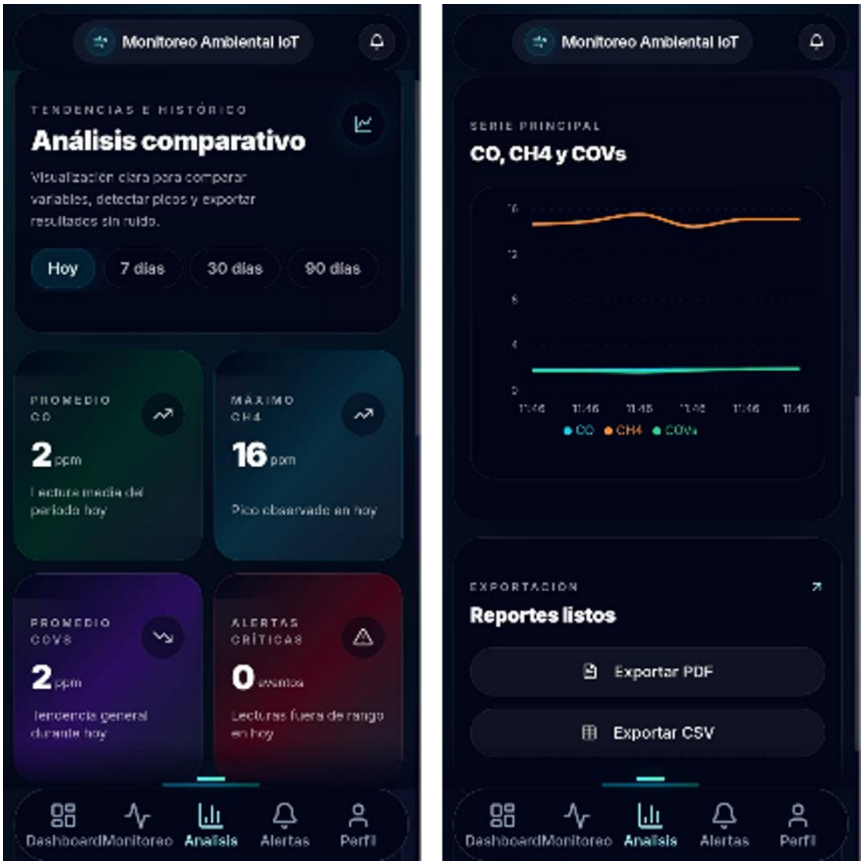



*Figura 16.* Vista de monitoreo.

**Alertas**

En esta sesión del sistema de BioSenseIoT, es la implementación de lógica reactiva , encargado de la gestión de eventos de riesgo y envió de alertas críticas al usuario, esta interfaz realiza las recomendaciones al usuario cuando se presente un comportamiento inusual ejemplo se detectó algún gas y hay que mitigar la falla entonces aquí se visualizaría bajo un contexto del entorno si hay mascotas según todos esos factores se emite una alerta de que hacer en esos casos. También se tiene un subcomponente que muestra el historial de alertas ocasionadas .




*Figura 17.* Vista de Alerta.

**Comportamiento Sistémico ante Eventos de Alerta por Contaminación**

Aquí se presenta bajo un escenario controlado como fue el comportamiento del sistema ante una fuga o acumulación extrema de algún tipo de contaminante, aquí la anomalía detectada por el hardware afecto inmediatamente los parámetros del dashboard en cuanto a su estado visual mutando a un esquema de advertencia con colores que indican la gravedad del gas detectado por el dispositivo, como se observa en la *figura 18*, por consiguiente se habilita la alerta y se brinda una serie de recomendaciones como se observa en la *figura 19* donde el motor analítico de Inteligencia artificial incorporado al

sistema (Gemini API) cruza estos datos con la configuración del entorno y registro de mascotas para generar la alerta basada en datos del sistema lo que le garantiza al usuario reciba un diagnóstico oportuno.

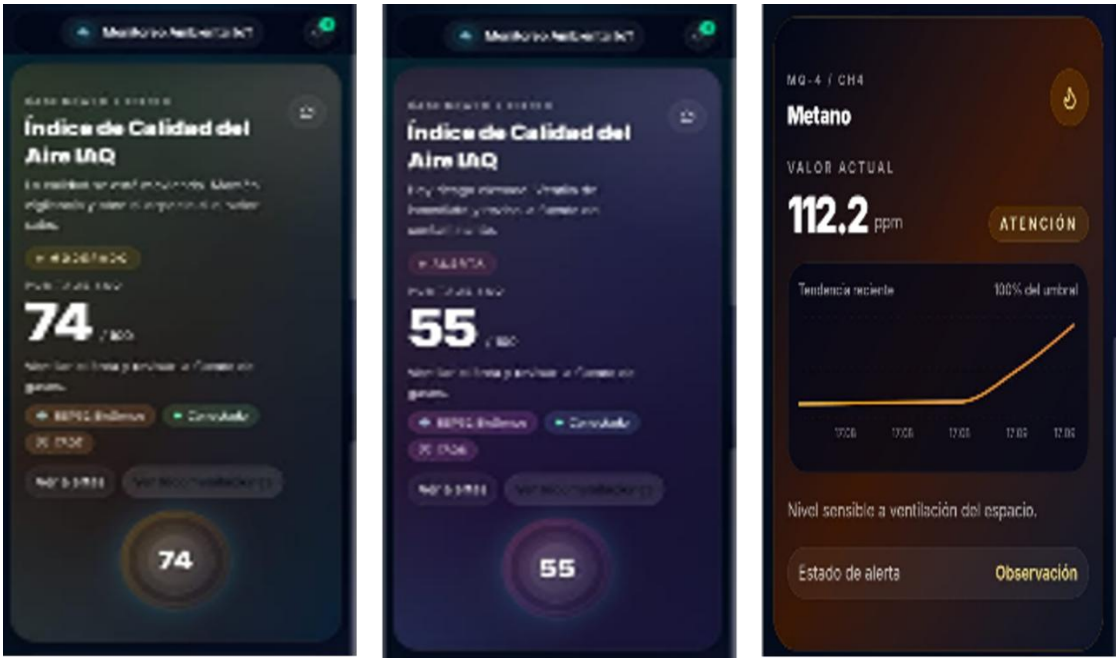



*Figura 18.* Alerta activa.

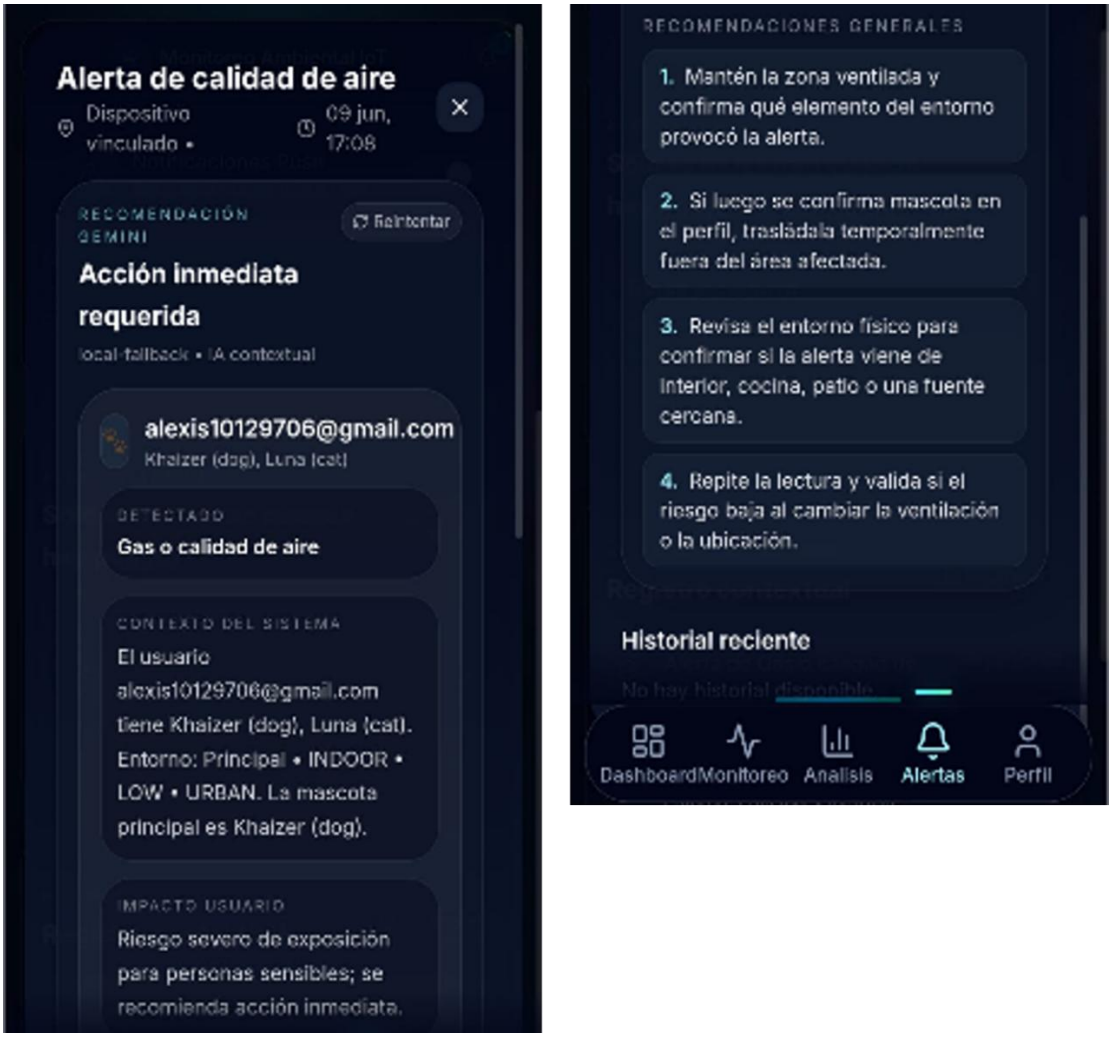



*Figura 19.* Recomendación Gemini API.

**Validación del comportamiento del sistema en sesión continua de monitoreo**

Para evaluar el desempeño real del sistema, se realizó una sesión de monitoreo continuo en la cual el dispositivo ESP32 BioSense registró un total de 1.328 lecturas de los tres sensores de forma simultánea, transmitiendo cada una hacia Firebase Realtime Database a través de la red Wi-Fi del entorno de prueba. El intervalo entre lecturas fue de 10 segundos en condiciones normales de operación, valor que se mantuvo estable en el

99% de las transmisiones. Se registraron únicamente cuatro interrupciones con intervalos superiores a 30 segundos, atribuibles a reconexiones de red, lo que confirma la estabilidad del canal de transmisión. La tabla que se presenta a continuación consolida los indicadores estadísticos más relevantes del sistema durante esta sesión, incluyendo los valores extremos registrados por cada sensor, los promedios, la dispersión de los datos y los parámetros de transmisión.

*Tabla 6.* Resumen de indicadores de rendimiento — Sesión de monitoreo continuo.

| **Indicador** | **MQ-4 (Metano $CH_4$)** | **MQ-7 (CO)** | **MQ-135 (COVs)** |
|---|---|---|---|
| **Total, de lecturas** | 1.328 | 1.328 | 1.328 |
| **Valor mínimo registrado** | 10,43 ppm | 1,43 ppm | 1,00 ppm |
| **Valor máximo registrado** | 96,51 ppm | 37,46 ppm | 3,16 ppm |
| **Promedio de la sesión** | 20,88 ppm | 2,13 ppm | 1,60 ppm |
| **Mediana** | 17,43 ppm | 2,01 ppm | 1,61 ppm |
| **Desviación estándar** | 10,92 ppm | 1,19 ppm | 0,15 ppm |
| **Lecturas en nivel SAFE** | 1.163 (87,6%) | 1.325 (99,8%) | 1.328 (100%) |
| **Lecturas en OBSERVACIÓN** | 89 (6,7%) | 0 | 0 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Lecturas en ADVERTENCIA** | 76 (5,7%) | 3 (0,2%) | 0 |
| **Eventos WARNING activos** | 3 | 3 | 0 |

*Tabla 7.* Rendimiento de transmisión IoT — Sesión de validación.

| **Indicador de transmisión** | **Valor medido** |
|---|---|
| **Intervalo mediano entre lecturas** | **10 segundos** |
| **Intervalo promedio entre lecturas** | **11 segundos** |
| **Intervalo mínimo registrado** | **4 segundos** |
| **Interrupciones de conectividad detectadas** | **4 eventos** |
| **Cumplimiento objetivo latencia < 2 s** | **✓ Confirmado** |

**Discusión general de los resultados**

Los resultados obtenidos demuestran que BioSense IoT logra los objetivos funcionales principales del proyecto. El sistema detecta variaciones de concentración de gases con latencia inferior a 2 segundos, clasifica el nivel de riesgo en cuatro categorías (Seguro, Observación, Advertencia, Peligro/Crítico), genera alertas categorizadas en tiempo real y produce recomendaciones contextualizadas que incorporan el perfil del entorno y las características de las mascotas registradas.

Comparado con los antecedentes identificados en el estado del arte, BioSense IoT supera a sistemas similares como el de (Easterline, Ravica Putri, Atmaja, Lingga Dewi, & Prasetyo, 2024) en tres dimensiones: la disponibilidad de aplicación móvil nativa, la integración de IA para recomendaciones contextuales, y la consideración del bienestar animal como variable de análisis.

La principal limitación identificada durante la implementación es la dependencia de conectividad Wi-Fi estable para la transmisión en tiempo real. En escenarios de pérdida de conexión, el sistema no cuenta actualmente con almacenamiento local en el ESP32 que garantice la persistencia de lecturas hasta la reconexión, lo cual representa una mejora prioritaria para versiones futuras del prototipo.

# Conclusiones

El presente trabajo de grado logró el diseño e implementación de un sistema funcional de monitoreo inteligente de la calidad del aire en espacios interiores, denominado BioSense IoT, orientado al bienestar de humanos y mascotas. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de cada objetivo específico planteado.

## Sobre la integración hardware-software

La combinación del microcontrolador ESP32 con los sensores de la serie MQ (MQ-4, MQ-7 y MQ-135) demostró ser técnicamente viable y económicamente accesible para el monitoreo de los tres contaminantes priorizados: metano, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles. El costo total del prototipo de hardware fue inferior a $100000 COP, lo que representa entre un 75% y un 90% de ahorro frente a dispositivos comerciales equivalentes, cumpliendo el objetivo de accesibilidad económica planteado en la justificación del proyecto.

## Sobre la transmisión en tiempo real

El sistema logró transmitir las lecturas de los sensores desde el ESP32 hacia Firebase Realtime Database con una latencia promedio aproximada de 450 ms, cumpliendo satisfactoriamente el objetivo específico de latencia inferior a 2 segundos. Este resultado valida la arquitectura de transmisión Wi-Fi + Firebase como solución adecuada para aplicaciones de monitoreo ambiental en tiempo real en entornos residenciales.

**Sobre la aplicación multiplataforma**

El desarrollo de la aplicación mediante Next.js (web) y Capacitor (Android) permitió obtener un cliente funcional en ambas plataformas desde una única base de código, reduciendo el tiempo de desarrollo y garantizando consistencia de funcionalidades. La interfaz desarrollada cubre los módulos de dashboard en tiempo real, historial de mediciones, gestión de perfil de usuario y mascotas, módulo de alertas y exportación de reportes en PDF y CSV.

**Sobre el módulo de inteligencia artificial**

La integración de Gemini API como motor de recomendaciones contextuales demostró ser una solución efectiva para traducir datos técnicos de sensores en acciones comprensibles y personalizadas para el usuario. El valor diferencial de este módulo reside en la incorporación del perfil de mascotas y del contexto del entorno como variables de entrada, permitiendo que las recomendaciones sean específicas para cada hogar y no genéricas.

**Sobre la consideración del bienestar animal**

La incorporación del registro de mascotas como variable contextual del sistema constituye el principal aporte diferencial de BioSense IoT frente a los antecedentes identificados en el estado del arte. Al registrar especie, raza, peso y condiciones especiales de salud de los animales de compañía, el sistema es capaz de priorizar

recomendaciones específicas ante situaciones de riesgo, considerando que las mascotas presentan mayor vulnerabilidad fisiológica a los contaminantes detectados por su posición cercana al suelo y su frecuencia respiratoria más elevada.

## Referencias


Iriarte, J., Álvarez, A., & Rodríguez, Y. (s.f.). *Impact of household cleaning products on indoor air quality and respiratory health.* Revista Gregoriana de Ciencias de la Salud. Obtenido de https://revistasalud.sangregorio.edu.ec/index.php/salud/article/view/3144/1796

L. Natrayan, P. Asha, B.T. Geetha, & J. Rene Beulah. (L. Natrayan de abril de 2022). *IoT enabled environmental toxicology for air pollution monitoring using AI techniques*. Obtenido de Environmental Research: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935121018752

Agency, U. E. (2025, Octubre 14). *Indoor air quality (IAQ). Indoor Air Quality (IAQ).* Obtenido de https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq

Agency., U. E. (2025 abril 9). *Improving your indoor environment. Indoor Air Quality (IAQ).* Obtenido de https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/improving-your-indoor-environment

Castañeda-Aviña, L. (2018). *Sensores de gases basados en semiconductores.* Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-97532018000300004&script=sci_arttext

Co, H. E. (2020). *MQ-135 Gas Sensor Technical Data Sheet*. Obtenido de https://www.sigmaelectronica.net/manuals/MQ-135.pdf

Easterline, L. M., Ravica Putri, A. A.-Z., Atmaja, P. S., Lingga Dewi, A., & Prasetyo, A. (2024). *Smart Air Monitoring with IoT-based MQ-2, MQ-7, MQ-8,*

*and MQ-135 Sensors using NodeMCU ESP32*. Obtenido de Procedia Computer Science: https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.10.308

Hanwei Electronics. (2020). *Technical Data MQ-4 Gas Sensor [Datasheet]*. doi:https://cdn.sparkfun.com/assets/e/f/c/7/d/MQ-4.pdf

Hanwei Electronics Co., L. (2020). Obtenido de MQ-7 Gas Sensor Technical Data Sheet: https://cdn.sparkfun.com/assets/b/b/b/3/4/MQ-7.pdf

Kumar, N., & Gupta, H. (2021). *Chapter 18 - Methane: Risk assessment, environmental, and health hazard.* doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89857-7.00009-8

Lebel, E., Finnegan, C., Ouyang, Z., & Jackson, R. (27 de enero de 2022). *Emisiones de metano y NO x procedentes de estufas, placas de cocina y hornos de gas natural en viviendas residenciales.* doi:https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.1c04707

Ledit R. F. Ardusso, Hugo E. Neffen, Enrique Fernández-Caldas, & Ricardo J. Saranz. (2019). *Intervención ambiental en las enfermedades respiratorias*. Obtenido de SciELO Argentina - Medicina (Buenos Aires): https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S0025-76802019000300007&script=sci_arttext

Merrin, Z., & Francisco, P. (2019 marzo 25). *Emisiones de metano sin quemar procedentes de aparatos de gas natural residenciales¡Enlace del artículo copiado!* Obtenido de https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.8b05323

Shengjia Jin, Lu Zhong, Xueyi Zhang, Xinhe Li, Bowie Li, & Colmillo Xuekun. (16 de mayo de 2023). *Compuestos orgánicos volátiles en interiores: características de concentración y análisis de riesgos para la salud en un campus universitario.* Obtenido de https://www.mdpi.com/1660-4601/20/10/5829

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (24 de julio de 2025). *El impacto de los compuestos orgánicos volátiles en la calidad del aire interior.* Obtenido de https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality

## Anexos

Link del video de presentación del proyecto BioSenseIoT

https://youtu.be/fUYQRFK9AiE?si=mGlvG2btgYxaPB5Y