

**Transición de la gestión tradicional a smart farming en microempresas avícolas mediante el  
monitoreo de variables ambientales usando sensórica e IoT**

John Alejandro Figueredo Luna

Ricardo Andrés Mejía Córdoba

Asesor

Juan Alejandro Chica García

Codirector

Darío José Delgado

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería -ECBTI

Maestría en Gestión de Tecnologías de la Información

2025

---

Ricardo Andrés Mejía Córdoba

---

John Alejandro Figueredo Luna

---

Juan Alejandro Chica García

---

Darío Jose Delgado

---

Jurado

---

Jurado

### **Dedicatoria**

El desarrollo de este trabajo se lo dedico a mi familia paterna quien tuvo la entereza de recibirme en el seno de su hogar a pensar de las condiciones en las que nací. Gracias a su amor y cuidados me pude superar y llegar a estas instancias en mi vida profesional de optar por un título del nivel de formación de maestría. Pues ellos siempre han estado ahí para alentarme y animarme a seguir adelante por ello todo lo que emprendo y hago es por el bienestar de ellos.

Ricardo Mejía.

Dedico este trabajo a mi esposa, Sandra Patricia, la mujer que amo y la persona más importante de mi vida, porque sin su apoyo no hubiese podido alcanzar esta nueva formación para mi vida, a mis hija Daniela Alejandra e Ivy Daiana, por ser el motor de mi existencia, por estar siempre apoyándome a alcanzar cada meta que me he propuesto, por ser parte de sus vidas y por permíteme ser ejemplo para su desarrollo personal y profesional.

John Figueredo.

## **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a nuestras familias quienes nos han acompañado en estos años de estudio y nos han animado a no desfallecer en el proceso a pesar de las diferentes circunstancias que nos hicieron flaquear durante este fuerte proceso de estudio que nos ha permitido dejar este prototipo de producto que puede ser potenciado para que a futuro beneficie no solo el sector avícolas sino todos aquellos que tengan que ver con la crianza de animales y cultivo de productos

## Resumen

La presente investigación se enfoca en la transformación digital de las microempresas avícolas, un sector estratégico en la producción de alimentos a nivel global. El objetivo principal es desarrollar e implementar un sistema integrado de monitoreo y análisis de datos que permita optimizar los procesos productivos, incrementar la eficiencia operativa y garantizar la sostenibilidad de estas unidades empresariales.

A través del uso de sensores basados en Internet de las Cosas (IoT), se recopilaban datos en tiempo real sobre variables ambientales clave, como material particulado (PM1, PM2.5, PM10), temperatura, humedad relativa, monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esta información es procesada mediante algoritmos avanzados de análisis de datos, con el fin de identificar patrones, tendencias y correlaciones que impactan directamente el rendimiento en actividades productivas como la cría de pollos.

Una de las innovaciones centrales del proyecto es el diseño de una plataforma de visualización intuitiva, que permite a los productores acceder fácilmente a la información recopilada. Esta herramienta proporciona capacidades de análisis y visualización que respaldan la toma de decisiones informadas, permitiendo ajustes en tiempo real de los parámetros de producción para optimizar los resultados.

Además de mejorar la eficiencia operativa, el sistema propuesto contribuye a la sostenibilidad de las microempresas avícolas. Al monitorear y analizar las variables ambientales es posible identificar oportunidades para reducir costos y minimizar el impacto ambiental.

La metodología contempla la selección de galpones avícolas representativos, el diseño e instalación de los sistemas de monitoreo, la recolección y procesamiento de datos, el desarrollo

de la plataforma digital y la evaluación del impacto en indicadores clave de desempeño productivo.

Se espera que los resultados de esta investigación generen un aporte significativo al sector avícola, al fortalecer la competitividad de las microempresas rurales, facilitar su adaptación a los efectos del cambio climático y mejorar su capacidad de respuesta a las exigencias de los consumidores en términos de calidad y sostenibilidad. Asimismo, el proyecto podría constituirse en un modelo replicable para la aplicación de tecnologías digitales en otros subsectores agrícolas.

***Palabras Clave:*** Internet de las Cosas (IoT), Variables Ambientales, Sostenibilidad, Microempresas Avícolas, Granja Inteligente, Automatización, Análisis de Datos, Transformación Digital, Desarrollo Rural.

## Abstract

This study addresses the digital transformation of poultry microenterprises, a strategic sector in global food production. The primary objective is to design and implement an integrated monitoring and data analysis system to optimize production processes, enhance operational efficiency, and ensure the sustainability of these business units.

Real-time data were collected through Internet of Things (IoT) sensors on key environmental variables such as particulate matter (PM1, PM2.5, PM10), temperature, and relative humidity, as well as energy-related indicators such as carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). This information is processed using advanced data analysis algorithms to identify patterns, trends, and correlations that directly influence productivity in poultry farming.

A core innovation of this project is the development of an intuitive visualization platform that enables producers to easily access and interpret collected data. The platform includes analytical and visualization tools to support informed decision-making, allowing real-time adjustments to production parameters for optimized outcomes.

Beyond operational improvements, the proposed system contributes to the sustainability of poultry microenterprises. Monitoring and analyzing energy use and resource consumption (e.g., water and feed) allows the identification of cost-saving opportunities and environmental impact mitigation.

The research methodology includes the selection of representative poultry sheds, design and installation of monitoring systems, data collection and processing, platform development, and performance evaluation of poultry production systems.

The expected outcomes of this study will significantly benefit the poultry sector by enhancing the competitiveness of rural microenterprises, enabling adaptation to climate change,

and improving responsiveness to consumer demands for high-quality and sustainable products. Additionally, this project is intended to serve as a replicable model for digital technology adoption in other agricultural subsectors.

***Keywords:*** Internet Of Things (Iot), Energy Efficiency, Sustainability, Poultry Microenterprises, Smart Farming, Automation, Data Analysis, Digital Transformation, Rural Development

## Tabla de Contenido

Introducción .....	15
Objetivos .....	16
Objetivo General .....	16
Objetivos Específicos .....	16
Planteamiento del Problema.....	17
Definición del Problema.....	17
Justificación.....	19
Marco Conceptual y Teórico.....	21
Metodología .....	28
Tipo de Investigación .....	28
Enfoque Metodológico .....	28
Definición y Justificación de Variables Ambientales .....	29
Fases del desarrollo de la Aplicación Web .....	31
Diseño de Arquitectura del Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales .....	33
Diagrama de Bloques .....	33
Componentes del Circuito .....	35
Arquitectura de Software del Dispositivo IoT .....	36
Desarrollo de Aplicación Web para Facilitar la Comunicación entre Usuarios y los Sensores de Medición.....	38
Etapa 1 Definición de Requisitos .....	38
Etapa 2 Análisis del Sistema .....	45

Arquitectura de Software .....	10
Etapa 3: Diseño del Sistema.....	49
<i>Flujo de Datos</i> .....	49
Prototipos de Interfaces de la Aplicación Web .....	53
Etapa 4: Integración de la Plataforma Digital .....	64
Herramientas para el Desarrollo de la Aplicación Web .....	65
Evaluación del Desempeño del Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales en una Microempresa Piloto .....	68
Alistamiento y Montaje del Dispositivo en el Laboratorio .....	68
Instalación del Sistema en la Microempresa Avícola como Prueba Piloto.....	71
Análisis de Variables Ambientales Capturadas en el Galpón 1 .....	74
Análisis de Variables Ambientales Capturadas en el Galpón 2 .....	83
Recomendaciones para los Galpones Posterior a la implementación de los Dispositivos IoT .....	98
Conclusiones .....	106
Recomendaciones.....	108
Referencias Bibliográficas .....	110

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> <i>Componentes del Hardware del Circuito</i> .....	35
<b>Tabla 2</b> <i>Definición de Requisitos del Sistema</i> .....	39
<b>Tabla 3</b> <i>Herramientas utilizadas para la fase de desarrollo</i> .....	65
<b>Tabla 4</b> <i>Recomendaciones Generales para los dos Galpones</i> .....	<u>99</u>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Diagrama de Bloques Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales Basado en ESP32</i> .....	34
<b>Figura 2</b> <i>Diagrama de Arquitectura de Software del Dispositivo IoT</i> .....	37
<b>Figura 3</b> <i>Diagrama de Arquitectura de la Aplicación Web</i> .....	46
<b>Figura 4</b> <i>Diagrama de Secuencia de la Plataforma Web</i> .....	47
<b>Figura 5</b> <i>Diagrama de Casos de Uso del Aplicación Web</i> .....	48
<b>Figura 6</b> <i>Diagrama de Flujo de Datos de la Aplicación</i> .....	52
<b>Figura 7</b> <i>Página Principal Aplicación Web</i> .....	54
<b>Figura 8</b> <i>Filtro de Módulo de Medición de Temperatura</i> .....	55
<b>Figura 9</b> <i>Visualización de Mediciones de Temperatura</i> .....	56
<b>Figura 10</b> <i>Filtro de Módulo de Medición del Nivel de Dióxido de Carbono</i> .....	57
<b>Figura 11</b> <i>Visualización de Mediciones de Nivel de Dióxido de Carbono</i> .....	58
<b>Figura 12</b> <i>Filtro de Módulo de Medición de Nivel de Humedad</i> .....	59
<b>Figura 13</b> <i>Visualización de Mediciones de Nivel de Humedad</i> .....	60
<b>Figura 14</b> <i>Filtro de Módulo de Medición de Nivel de Carbono</i> .....	61
<b>Figura 15</b> <i>Visualización de Mediciones de Nivel de Carbono</i> .....	62
<b>Figura 16</b> <i>Filtros para Consultar Mediciones del Nivel de Material Particulado</i> .....	63
<b>Figura 17</b> <i>Visualización de las Mediciones de Material Particulado</i> .....	64
<b>Figura 18</b> <i>Montaje en Placa de Pruebas de Dispositivo IoT</i> .....	69
<b>Figura 19</b> <i>Codificación Controlador ESP8266EX</i> .....	70
<b>Figura 20</b> <i>Dispositivo IoT Instalado el Galpón 1</i> .....	71
<b>Figura 21</b> <i>Dispositivo IoT Instalado en el Galpón 2</i> .....	72

<b>Figura 22</b> <i>Registro de Datos Capturados por el Dispositivo IoT Instalado</i> .....	13
<b>Figura 23</b> <i>Temperatura Promedio Registrada en el Galpón 1</i> .....	73
<b>Figura 24</b> <i>Humedad Promedio Registrada en el Galpón 1</i> .....	74
<b>Figura 25</b> <i>CO2 Promedio Registrado en el Galpón 1</i> .....	76
<b>Figura 26</b> <i>CO Promedio Registrado en el Galpón 1</i> .....	77
<b>Figura 27</b> <i>Material Particulado Promedio Registrado en el Galpón 1</i> .....	80
<b>Figura 28</b> <i>Temperatura Promedio Mensual Registrado en el Galpón 1</i> .....	82
<b>Figura 29</b> <i>Humedad Relativa Promedio Mensual Registrado en el Galpón 2</i> .....	84
<b>Figura 30</b> <i>Nivel de CO2 Promedio Registrado en el Galpón 2</i> .....	86
<b>Figura 31</b> <i>Nivel de CO Promedio Registrado en el Galpón</i> .....	88
<b>Figura 32</b> <i>Nivel de Material Particulado Promedio Registrado en el Galpón 2</i> .....	90
	92

**Lista de Apéndices**

<b>Apéndice A</b> <i>Repositorio del Código Fuente del Sistema Desarrollado</i> .....	114
<b>Apéndice B</b> <i>Registro de Datos de los Dispositivos IoT por cada Galpón de Prueba</i> .....	115
<b>Apéndice C</b> <i>Capturas del Proceso de Desarrollo de la Aplicación Web</i> .....	116

## Introducción

La producción avícola a pequeña escala es esencial en la cadena alimentaria global, pero enfrenta desafíos significativos en términos de eficiencia y sostenibilidad. La gestión tradicional, que se basa en la experiencia y la intuición, limita la capacidad de los productores para optimizar sus procesos y adaptarse a un mercado en constante cambio.

El sector avícola es un gran consumidor de energía, principalmente para la climatización de galpones, la operación de equipos de ventilación y la iluminación artificial. Según un estudio de la FAO, el consumo energético en la producción avícola representa una parte considerable de los costos de producción, lo que impacta directamente en la rentabilidad de las empresas (FAO, 2013). Este alto consumo energético también contribuye al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, agravando el problema del cambio climático.

El cambio climático tiene consecuencias directas en la producción avícola, incluyendo el aumento de la temperatura global, eventos climáticos extremos y la escasez de agua. Estos factores afectan la producción y la eficiencia del sector, lo que hace que la adopción de tecnologías digitales sea una oportunidad clave para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia en la avicultura.

El presente proyecto de investigación se centra en el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de variables ambientales basado en el Internet de las Cosas (IoT) para microempresarios avícolas. Este sistema permitirá la toma de decisiones informadas y la optimización de los procesos productivos. La implementación de tecnologías digitales puede ayudar a los productores a reducir el consumo energético y sus costos asociados, al mismo tiempo que se minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero.

## Objetivos

### Objetivo General

Implementar un sistema de información basado en el concepto de *Smart Farming* para la gestión y monitoreo de variables ambientales en microempresas avícolas, mediante el uso de sensórica e IoT, con el fin de optimizar la toma de decisiones en los procesos de producción

### Objetivos Específicos

Diseñar la arquitectura del sistema de información para el monitoreo de variables ambientales y, definiendo los componentes de hardware y software requeridos para su implementación.

Desarrollar una aplicación web intuitiva que facilite la interacción entre los usuarios y los sensores de medición, mediante una interfaz accesible que permita la recolección de datos en tiempo real y mejore la experiencia del usuario.

Evaluar el desempeño del sistema de monitoreo en una finca piloto, analizando su utilidad para la gestión y mantenimiento de los galpones.

## Planteamiento del Problema

### Definición del Problema

La transición de la gestión tradicional a Smart Farming en microempresas avícolas representa un cambio crucial en la forma en que se manejan los recursos y se optimizan los procesos productivos.

Las microempresas avícolas son fundamentales para la producción de alimentos a nivel mundial, pero enfrentan desafíos significativos que limitan su eficiencia y sostenibilidad. Los métodos tradicionales de gestión, que dependen de la intuición y la experiencia, a menudo resultan en un uso ineficiente de los recursos y en una producción inconsistente (Moreira Rosales et al., 2019).

Además, la falta de herramientas tecnológicas adecuadas impide a estas empresas monitorear y controlar las variables ambientales que afectan directamente su rendimiento productivo (Chanchí Golondrino et al., 2021). El uso de tecnologías IoT (Internet de las Cosas) en la agricultura, conocido como Smart Farming, ofrece una solución viable a estos problemas. Estas tecnologías permiten la recopilación y análisis de datos en tiempo real sobre variables como temperatura, humedad y calidad del aire, lo que facilita la toma de decisiones informadas y mejora la eficiencia operativa (UNABIZ, 2023).

La implementación de sensores y dispositivos conectados no solo optimiza el manejo de los recursos, sino que también contribuye a la sostenibilidad al permitir un uso más responsable y eficiente de los insumos. Sin embargo, la transición hacia Smart Farming no es sencilla. Las microempresas avícolas deben superar barreras como la falta de conocimiento técnico, la resistencia al cambio y la inversión inicial en tecnología. Este proyecto busca abordar estos

desafíos mediante el desarrollo e implementación de un sistema integrado de monitoreo y análisis de datos, que permita a las microempresas avícolas adoptar prácticas más sostenibles y eficientes.

## Justificación

El proyecto está enfocado en la forma de gestionar las fincas avícolas a pequeña escala. Al reemplazar la gestión tradicional, basada en la intuición y la experiencia, por un enfoque de agricultura de precisión, este proyecto busca optimizar los procesos productivos, aumentar la eficiencia y mejorar la sostenibilidad de las microempresas avícolas.

El eje central de este proyecto es la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real que, a través de sensores y tecnologías IoT, recolecta datos precisos sobre las variables ambientales que influyen directamente en el desarrollo óptimo de las aves. Esta información detallada y actualizada permite a los productores tomar decisiones más acertadas y ajustar las condiciones de producción a las necesidades específicas de cada galpón.

Desde una perspectiva académica, esta investigación contribuye a expandir las fronteras del conocimiento en el campo de la agricultura de precisión, específicamente en la aplicación de tecnologías IoT en sistemas avícolas de pequeña escala. Al articular teorías y prácticas, este proyecto permitirá generar nuevos conocimientos que enriquecerán el debate académico y sentarán las bases para futuras investigaciones.

A nivel social, el impacto de este proyecto es significativo. Al optimizar el monitoreo de variables ambientales, el proyecto "Transición a Smart Farming" contribuye a garantizar la seguridad alimentaria, al aumentar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción. Asimismo, la adopción de tecnologías digitales en el sector agrícola puede impulsar el desarrollo rural, generando nuevas oportunidades de empleo y mejorando la calidad de vida de los productores.

La motivación de este proyecto radica en el interés de aplicar tecnologías innovadoras para resolver problemas reales y contribuir a un futuro más sostenible. La convicción de que la

tecnología puede ser una herramienta poderosa para transformar el sector agrícola motiva la realización de esta investigación.

El proyecto se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible, en particular aquellos relacionados con la seguridad alimentaria, la producción y el consumo responsables, y la acción por el clima. Al abordar los desafíos que enfrentan las microempresas avícolas y al promover prácticas agrícolas más sostenibles, este proyecto contribuye a construir un futuro más justo y equitativo para todos.

Finalmente, este proyecto cobra relevancia para la Universidad Nacional Abierta y a Distancia ya que se alinea directamente con los objetivos del proyecto titulado "Análisis del Riesgo de Viabilidad Técnica en Proyectos de Transición Energética en Actividades Ganaderas y Empresas Agropecuarias". Que hace parte de la convocatoria No.12 cohorte 1 – soluciones innovadoras para un futuro sostenible. Al desarrollar y evaluar un sistema de monitoreo de variables ambientales se aporta una solución práctica y tangible a los desafíos identificados en este estudio. Además, se complementa la investigación al proporcionar evidencia empírica sobre la viabilidad técnica y económica de implementar estas soluciones en el sector avícola como parte del sector agropecuario de la región.

## **Marco Conceptual y Teórico**

El concepto de Smart Farming, también conocido como agricultura inteligente, implica la adopción de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la gestión de las explotaciones agrícolas. Este enfoque está basado en el uso de herramientas como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de big data y la inteligencia artificial (IA) para el monitoreo y control de variables clave en tiempo real (García & Pérez, 2021). En el contexto de la avicultura, la implementación de estas tecnologías permite la optimización de los procesos productivos, mejorando el bienestar animal y reduciendo los costos operativos mediante el uso eficiente de recursos como la energía y el agua.

En Colombia y otros países, se ha identificado la necesidad de incluir el desarrollo tecnológico en procesos tradicionales para asegurar el éxito de las explotaciones; por ejemplo, en la crianza avícola, la adopción de soluciones tecnológicas integrales ha sido clave para mejorar la productividad y rentabilidad del negocio (Hilarón Novoa et al., 2020). Esta inclusión de tecnologías digitales en el agro forma parte de un proceso más amplio de transformación digital rural, que busca modernizar las actividades del campo mediante la integración de herramientas TIC y prácticas de Agricultura de Precisión orientadas por datos.

La agricultura de precisión es un componente clave del Smart Farming, que busca maximizar la eficiencia a través del análisis detallado de datos obtenidos en tiempo real. En lugar de depender únicamente de la experiencia empírica de los agricultores, se utilizan sensores y dispositivos para recopilar información sobre el clima, el suelo, el comportamiento de los animales y otros factores ambientales. Esta información es procesada y analizada por sistemas de inteligencia artificial, lo que permite a los productores tomar decisiones más informadas y

precisas (Smith & Thompson, 2019). Esto no solo reduce las pérdidas y mejora la productividad, sino que también contribuye a una producción más sostenible.

La incorporación de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en la agricultura ha permitido automatizar y optimizar procesos, aumentando la productividad y la rentabilidad a través del acceso oportuno a información clave (Gómez, Pérez & Ramírez, 2016). En este contexto surgen los sistemas de información agrícolas, definidos como conjuntos integrados de herramientas tecnológicas (software y hardware) y procedimientos que recopilan, procesan, almacenan y difunden datos relevantes para apoyar la gestión y la toma de decisiones en las actividades agropecuarias. Estos sistemas, a menudo soportados en plataformas web y móviles, permiten a los productores y administradores agrícolas visualizar información en tiempo real, generar reportes y extraer indicadores de sus operaciones. Por ejemplo, un buen sistema de información puede estimar la producción futura de los cultivos en base a datos de siembra y condiciones climáticas, y relacionarla con las necesidades del mercado, reduciendo la incertidumbre en la comercialización (Gómez et al., 2016). De esta manera, se facilita la planificación y se mitigan desequilibrios entre oferta y demanda de productos agrícolas mediante la generación de información para la toma de decisiones

En particular, el uso del IoT en la avicultura ha demostrado ser una solución viable para enfrentar los desafíos relacionados con el monitoreo de variables ambientales. La sensorización en los galpones avícolas, que permite medir factores como la temperatura, la humedad y la calidad del aire, es esencial para garantizar un entorno adecuado para las aves, lo que repercute directamente en su salud y rendimiento (UNABIZ, 2023). Además, el monitoreo energético permite identificar patrones de consumo, lo que facilita la optimización del uso de energía y la reducción de los costos asociados al consumo eléctrico.

El monitoreo y control de variables ambientales constituye un factor determinante para garantizar el bienestar animal, optimizar el crecimiento y prevenir enfermedades. Variables como la temperatura, humedad relativa, concentración de CO<sub>2</sub>, niveles de amoníaco y material particulado (PM2.5 y PM10) influyen directamente en la salud y productividad de las aves. La integración de tecnologías IoT en este ámbito permite la captura de datos en tiempo real, facilitando la automatización de sistemas de ventilación, calefacción y humidificación, así como la generación de alertas tempranas ante condiciones fuera de los rangos óptimos establecidos por las guías técnicas (como las del estándar COBB). Este enfoque basado en datos no solo mejora el confort y el rendimiento de las aves, sino que también contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos en las fincas avícolas.

Además, la gestión de las variables ambientales es esencial en la producción avícola. Las condiciones ambientales dentro de los galpones, como la temperatura, la ventilación y la iluminación, afectan directamente el bienestar de las aves. Un manejo adecuado de estas variables puede mejorar significativamente la productividad y reducir la mortalidad. El uso de sensores IoT permite un monitoreo constante y preciso de estas condiciones, ajustando los sistemas de ventilación y calefacción en función de los cambios ambientales en tiempo real (Moreira Rosales et al., 2019). Esto no solo garantiza el bienestar animal, sino que también mejora la eficiencia operativa.

La enorme cantidad de datos generada por los sensores ambientales y energéticos debe convertirse en información útil para los responsables de la toma de decisiones. En este sentido, contar con plataformas de visualización de datos efectivas es tan importante como el propio despliegue de sensores. Las plataformas web y aplicaciones móviles desempeñan un papel clave en la agricultura inteligente, ya que permiten visualizar en tiempo real las variables

monitoreadas, revisar históricos de datos y recibir alertas, todo ello desde cualquier lugar con conexión a internet. Esta capacidad de supervisión remota es particularmente valiosa en las microempresas avícolas, donde el encargado puede no estar físicamente presente en el galpón todo el tiempo. Herramientas de dashboard en web presentan de forma gráfica indicadores como la temperatura actual del galpón, la humedad, el consumo eléctrico del día, o el estado de los equipos, facilitando una comprensión rápida de la situación. De hecho, la integración de sensores IoT con tecnologías web emergentes facilita la visualización centralizada del comportamiento de las condiciones ambientales de la finca con supervisión remota, lo cual abarata los costos de supervisión y mantenimiento al reducir la necesidad de estar in situ (Herrera Rubio & Ortiz, 2022). En la práctica, un productor podría acceder a un panel de control en su computadora o teléfono inteligente y constatar que todos los parámetros estén dentro de los rangos óptimos, recibiendo notificaciones inmediatas si ocurre alguna anomalía (por ejemplo, si la temperatura supera cierto umbral o si falla el suministro eléctrico).

El marco legal y regulatorio de Colombia respalda la adopción de tecnologías sostenibles en el sector agropecuario. La Ley 1715 de 2014 establece el marco normativo para la integración de energías renovables no convencionales al Sistema Interconectado Nacional (SIN), fomentando la diversificación de la matriz energética y reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Estas políticas han impulsado el uso de energías renovables en diversas áreas del sector agrícola, incluyendo la avicultura, donde se están implementando soluciones tecnológicas para optimizar el uso de la energía.

Uno de los principales desafíos que enfrentan las microempresas avícolas en la transición hacia Smart Farming es la falta de conocimiento técnico y la inversión inicial que requiere la implementación de tecnologías avanzadas. Si bien el uso de IoT y sensores puede aumentar la

eficiencia y reducir los costos a largo plazo, muchas microempresas carecen de los recursos financieros y técnicos necesarios para adoptar estas tecnologías (Chanchí Golondrino et al., 2021). Por lo tanto, es fundamental diseñar estrategias que faciliten la adopción de estas soluciones, incluyendo la capacitación técnica y el acceso a financiamiento.

Además de los beneficios económicos, la implementación de Smart Farming en la avicultura contribuye a la mitigación del cambio climático. La reducción del consumo energético y de los insumos agrícolas disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ayuda a reducir la huella de carbono del sector avícola. La sostenibilidad ambiental se ha convertido en un objetivo clave en la producción de alimentos, y la adopción de tecnologías digitales es una herramienta eficaz para alcanzar este objetivo (FAO, 2013).

Hablando un poco ya de experiencias de implementación de estos sistemas alrededor del mundo se puede mencionar el trabajo de (Herrera y Ortiz,2022) en el que logran implementa un sistema de control y monitoreo implementando internet de las cosas para medir variables físicas que intervienen en la cría y producción avícola permitiendo hacer una caracterización para generar un plan de acción darle manejo a la producción de acuerdo con el comportamiento de las variables

Otra experiencia que se puede destacar en este contexto es la de (Castillo, Cruz, Gonzaga y Luna, 2019) de México, en la cual logran implementar un sistema que controla el ajuste y monitoreo de variables como la temperatura y el CO<sub>2</sub> para lograr una producción avícola en un ambiente estable

Frente a esta problemática también se tiene el trabajo desarrollado por Espinoza, (2023) en Tungurahua Ecuador en la cual realiza el montaje de “una red de sensores inalámbricos (WNS) utilizando la tecnología LoRa en una finca avícola para producción de precisión”.

buscando evaluar la efectividad de esta tecnología en el control de variables ambientales y su efecto en la reducción de la tasa de mortalidad de las aves. En este mismo país se tiene el trabajo realizado por (Malliquinga y Villacís, 2017) el cual tu por objetivo “implementar un sistema de control de temperatura y dosificación de agua en la crianza de pollitas ponedoras de la empresa AVESCA, por medio de un PLC/HMI, para mantener el confort y bienestar animal en el Galpón San Francisco de la empresa AVESCA C.A”.

Para destacar de esta apuesta los autores concluyen que gracias a la recopilación histórica de datos se logra determinar que la temperatura tiene un comportamiento inversamente proporcional a la humedad y por ello es necesario contar con un sistema automatizado que permita el control de ambas si descuidar una o la otra ya que valores atípicos en alguna puede afectar el bienestar de los pollos en un galpón

Continuando con la identificación de proyectos o trabajos relacionados con la problemática central de este documento se puede mencionar a (Camacho, 2023) quien en su trabajo enfatiza en la necesidad de “estudiar los rangos óptimos que se aplican para medir la temperatura y amoníaco en un galpón, las normativas que rigen las mediciones y los sistemas de supervisión y control de parámetros químicos”. Lo anterior debido a que los niveles óptimos para la crianza de pollos varían de acuerdo a la edad de los mismos tal y como lo menciona Cobb-Vantress. (2021) en su manual.

Todo esto demuestra que el problema central de este proyecto ya viene siendo trabajado en diferentes partes del mundo, adicionalmente se deja en evidencia que la implementación de la tecnología de internet de las cosas resulta ser una buena herramienta para el control y monitoreo de las variables ambientales que intervienen en esta actividad de la crianza de aves siempre cuando se conozcan los valores óptimos de las variables respecto a su edad.

Finalmente, este proyecto no solo tiene implicaciones para la industria avícola, sino que también puede servir como modelo para otros sectores agrícolas. La adopción de tecnologías IoT y la implementación de sistemas de monitoreo de variables ambientales pueden ser replicadas en diferentes áreas del sector agropecuario, contribuyendo a la transformación digital de la agricultura en su conjunto. Al generar conocimientos y experiencias a través de este proyecto, se crea un marco para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la agricultura sostenible.

## Metodología

### Tipo de Investigación

La presente investigación adopta un enfoque metodológico mixto que combina una fase experimental con un proceso de desarrollo iterativo, orientado a garantizar la implementación exitosa de un sistema de información para el monitoreo de variables ambientales en microempresas avícolas.

El estudio se enmarca en una investigación aplicada de tipo experimental, ya que busca intervenir directamente en entornos reales mediante la implementación de una solución tecnológica y evaluar su impacto. Asimismo, se adopta un enfoque cuantitativo, dado que la validación del sistema se realizará a partir de la medición y análisis de variables **ambientales obtenidas** en condiciones controladas.

### Enfoque Metodológico

La metodología se estructura en dos componentes principales:

**Fase Experimental:** Se inicia con la selección de fincas piloto representativas, donde se realiza una caracterización inicial mediante la recolección de datos de variables ambientales (temperatura, humedad, material particulado, CO, CO<sub>2</sub>). Esta línea base permitirá evaluar posteriormente el impacto de la implementación del sistema propuesto.

**Desarrollo Iterativo:** A partir de los resultados obtenidos en la fase experimental, se implementa un proceso de desarrollo tecnológico bajo un modelo de cascada retroalimentada. Este modelo contempla ciclos continuos de diseño, desarrollo, prueba y ajuste del sistema, permitiendo incorporar mejoras progresivas en función de los aprendizajes de cada etapa.

## Definición y Justificación de Variables Ambientales

La elección de variables ambientales para el monitoreo en este proyecto responde a su impacto directo en el bienestar animal, la prevención de enfermedades y, consecuentemente, en el rendimiento productivo (Chanchí Golondrino et al., 2021). El éxito en la producción avícola depende en gran medida del monitoreo y control de las condiciones del entorno donde se desarrollan las aves. Un manejo inadecuado de estas puede resultar en un uso ineficiente de recursos y una producción inconsistente. La implementación de tecnologías de Smart Farming se centra en la medición de estas variables clave, cuya justificación se fundamenta en guías técnicas de la industria, como las del estándar COBB, que establecen los rangos óptimos para un desarrollo saludable.

Las variables ambientales seleccionadas para el monitoreo en tiempo real mediante sensorica e IoT son: temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM1, PM2.5, PM10).

1) Temperatura y humedad relativa: son dos de los factores más determinantes para el confort y la salud de las aves (UNABIZ, 2023). Mantener estos parámetros dentro de los rangos óptimos es crucial, ya que afectan directamente el metabolismo y el comportamiento de los pollos.

Una temperatura inadecuada puede causar estrés por calor o por frío, afectando negativamente la ganancia de peso y aumentando la mortalidad. La humedad relativa elevada, por su parte, favorece la proliferación de patógenos y el apelmazamiento de la cama, lo que incrementa el riesgo de enfermedades como la pododermatitis. El control automatizado de ambas variables es fundamental, pues tienen un comportamiento inversamente proporcional que requiere un manejo equilibrado (Camacho, 2023).

2) Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y Monóxido de carbono (CO): La calidad del aire dentro de los galpones es un indicador esencial del bienestar animal. Niveles elevados de gases como el CO<sub>2</sub> y el CO son perjudiciales para la salud respiratoria de las aves (UNABIZ, 2023).

El CO<sub>2</sub> es un indicador directo de la eficiencia de la ventilación. Una concentración elevada, generalmente por encima de 2,500-3,000 ppm según el manual Cobb 500, señala una renovación de aire insuficiente, lo que puede causar estrés fisiológico y reducir el rendimiento productivo. El CO, aunque monitoreado como un indicador secundario, es relevante para detectar problemas de combustión en sistemas de calefacción, ya que su acumulación puede ser tóxica. El monitoreo de ambos gases permite generar alertas tempranas para ajustar los sistemas de ventilación COBB-Vantress (2021).

3) Material Particulado (PM1, PM2.5 y PM10): El polvo en suspensión, compuesto por partículas de alimento, cama y material biológico, influye directamente en la salud respiratoria de las aves y del personal.

La concentración de material particulado, especialmente las fracciones más finas, puede irritar las vías respiratorias y transportar patógenos, aumentando la incidencia de enfermedades. Si bien los niveles suelen estar por debajo de los límites peligrosos, su monitoreo permite evaluar la calidad de la cama y la ventilación, contribuyendo a mantener un ambiente "limpio y respirable", como lo promueve el manual Cobb 500.

La selección de este conjunto de variables se alinea con investigaciones previas que han demostrado la viabilidad y los beneficios de usar tecnología IoT para el monitoreo ambiental en fincas avícolas, como las que realiza por Herrera Rubio y Ortiz (2022), Castillo et al. (2019) y Espinoza (2023). El monitoreo preciso y continuo de estos factores permite a los productores

pasar de una gestión basada en la intuición a una basada en datos, facilitando la toma de decisiones informadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de sus operaciones

### **Fases del desarrollo de la Aplicación Web**

A continuación, se describen las fases del proceso metodológico:

#### Análisis de requisitos

- Definición detallada de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema.
- Identificación de las necesidades de los usuarios (productores avícolas).
- Establecimiento de los objetivos específicos del proyecto y criterios de éxito.

#### Diseño del sistema

- Diseño de la arquitectura general, incluyendo hardware, software y componentes

IoT.

- Elaboración de diagramas de flujo, modelos de datos y esquemas de red.

#### Desarrollo

- Codificación del software de control y monitoreo de acuerdo con las

especificaciones técnicas.

- Desarrollo de la interfaz de usuario (UI) y experiencia de usuario (UX) mediante

aplicación web.

- Integración de sensores, microcontroladores, servidores y bases de datos.

#### Pruebas

- Ejecución de pruebas unitarias, de integración y de sistema.
- Validación del correcto funcionamiento de cada componente.
- Detección y corrección de errores.

#### Implementación

- Instalación del sistema en las fincas piloto.
- Configuración de sensores y dispositivos IoT.

#### Evaluación

- Recolección de datos sobre el desempeño del sistema.
- Comparación de los resultados con la línea base.
- Análisis del impacto en la toma de decisiones productivas.

#### Retroalimentación

- Revisión de los resultados obtenidos.
- Identificación de oportunidades de mejora.
- Actualización de requisitos y diseño para una nueva iteración.

## **Diseño de Arquitectura del Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales**

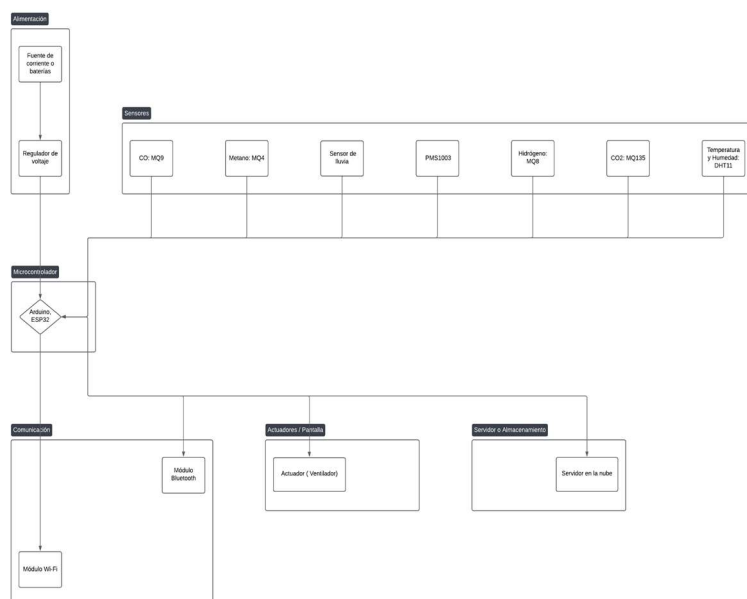
En el presente apartado se describen los componentes de hardware y de software que hacen parte del sistema de monitoreo de variables ambientales como herramienta de medición de variables que beneficia la actividad de siembra de diferentes cultivos en las microempresas avícolas de la región.

### **Diagrama de Bloques**

A nivel de hardware el sistema está compuesto por un módulo arduino ESP32 que permite la conexión de sensores y diferentes periféricos especiales para las implementaciones de internet de las cosas , este módulo hace parte del bloque de microcontroladores, para el bloque de sensores se tienen los siguientes : sensor de temperatura y humedad DHT11, sensor de dióxido de carbono MQ 135, sensor de polvo PMS1003, para el bloque de comunicación el sistema cuenta con un módulo de conexión a Bluetooth y otro de Wi-Fi para la conexión a internet, en cuanto a la parte de almacenamiento se posee un servicio de almacenamiento en la nube para que este tipo de infraestructura no esté a cargo del usuario final. Hablando del bloque de alimentación el sistema tiene una fuente de corriente o batería acompañada de un regulador de voltaje. Lo descrito anteriormente se muestra en el siguiente diagrama de bloques de la figura 1.

**Figura 1**

*Diagrama de Bloques Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales Basado en ESP32*



*Nota.* Diagrama de bloque que describe la interconexión de los componentes de hardware del sistema de monitoreo.

En la figura anterior se puede observar como el sistema se alimenta de una batería que está protegida por un regulador de voltaje para evitar picos y sobrecarga en el sistema, luego se puede evidenciar la parte del procesador central que se encuentra en una tarjeta arduino que es la encargada de realizar la captura de variables y el transporte de información al sistema de almacenamiento en la nube den quedará lista para ser consultada por el usuario a través de una aplicación web cuyo diseño y desarrollo se detallan más adelante en este documento. La comunicación entre los elementos que capturan las variables de medición y almacenamiento en la nube estará soportado por el módulo que permite la conexión wifia a internet.

## Componentes del Circuito

Los componentes del dispositivo a nivel de hardware son los que se describen a continuación en la tabla 1.

**Tabla 1**

### *Componentes del Hardware del Circuito*

Nombre de componente	Descripción
ESP8266EX	Su característica principal es la conectividad Wi-Fi (802.11 b/g/n) integrada, lo que la hace ideal para proyectos de Internet de las Cosas (IoT)
Sensor de Gas (MQ-7)	detecta la presencia de ciertos gases en el aire
Sensor de Temperatura y Humedad (DHT11)	mide la temperatura ambiente y la humedad relativa
Sensor de Partículas (PM Sensor - SDS011)	Este tipo de sensor se utiliza para medir la concentración de partículas finas en el aire (PM2.5, PM10), siendo un componente clave en monitores de calidad del aire

---

*Nota.* Componentes electrónicos que conforman el dispositivo IoT

## Arquitectura de Software del Dispositivo IoT

A nivel del software el dispositivo basado en internet de las cosas tendrá una arquitectura de N-capas en la cual se distinguen la capa de sensores, capa de procesamiento, capa de comunicación y capa de almacenamiento para lograr el transporte de datos desde el dispositivo a la plataforma web donde será visualizada por el usuario.

La capa de sensores es el conjunto de componentes electrónicos que son los encargados de capturar las variables bajo medición como son la temperatura, la humedad, carbono, dióxido de carbono y material particulado para que el usuario pueda tener un registro continuo de sus valores.

En cuanto a la capa de procesamiento es la encargada de ejecutar los algoritmos encargados de procesar la información capturada para ser transformada en valores y tipos de datos que puedan ser entendidos por el usuario.

La capa de comunicación recibe los datos procesados y es la encargada de transportarlos a la capa de almacenamiento a través de la ejecución de protocolos como MQTT, este posee un conjunto de reglas que sirve para la transmisión y recepción de datos entre dispositivos que hacen parte de una implementación IoT. (Amazon Web Services, s.f.), y se implementa a través de WebSocket que sirve para intercambiar datos a través del navegador web.

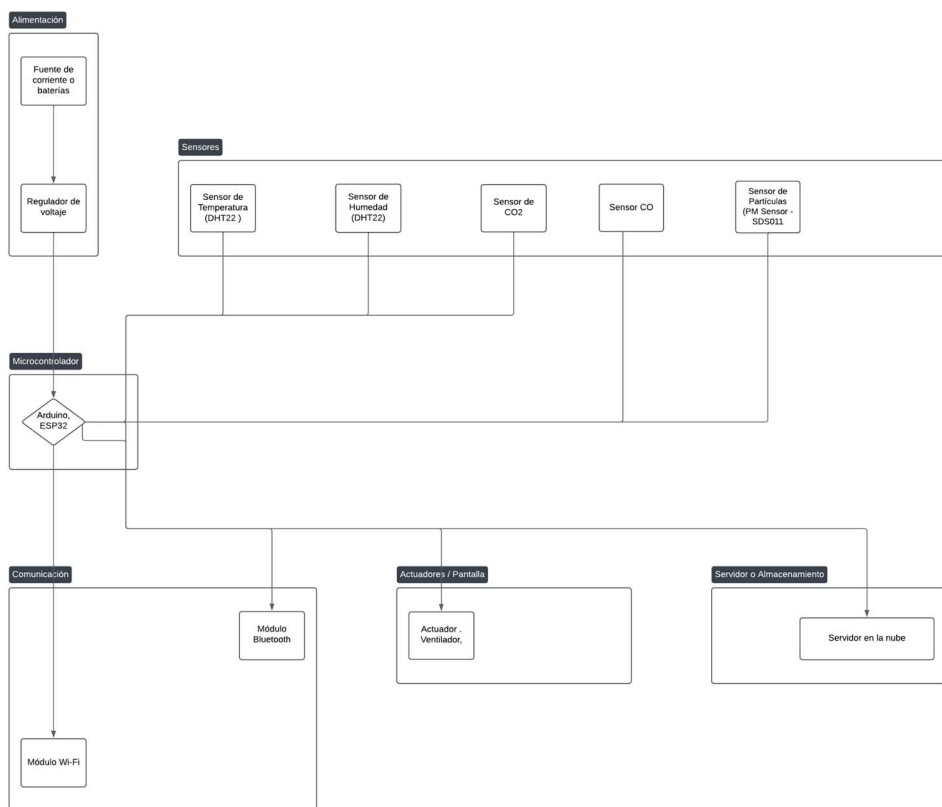
Capa de almacenamiento en esta capa cobra importancia el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP), el cual es encargado de transferir y recibir datos en formato de hipertexto a partir de peticiones basadas en estándares como RESTFUL o SOAP. que dictan la forma de comunicarse con las interfaces de programación de aplicaciones (API).

Finalmente se tiene la capa de almacenamiento la cual es la encargada de almacenar los datos luego de ser recolectados por la capa sensores, procesado por la capa de procesamiento y

transportados por la capa de comunicación. Esta capa está soportada por ThingSpeak que es un servicio de plataforma de análisis de IoT que permite agregar, visualizar y analizar flujos de datos en directo en la nube. Puede enviar datos a ThingSpeak desde sus dispositivos, crear visualizaciones instantáneas de datos en directo y enviar alertas” . (MathWorks, inc, 2025). Lo anterior se puede visualizar como se conecta a través del diagrama de la figura 2.

## Figura 2

*Diagrama de Arquitectura de Software del Dispositivo IoT*



*Nota.* Diagrama de bloques que describe la interconexión de los componentes de software del sistema de monitoreo.

## **Desarrollo de Aplicación Web para Facilitar la Comunicación entre Usuarios y los Sensores de Medición**

Tal y como se ha definido en la metodología de desarrollo del proyecto el sistema se desarrolla usando la metodología en cascada la cual consta de 5 etapas, definición de requisitos, análisis, diseño, desarrollo implementación, y pruebas. Cada una de estas se describen a continuación

### **Etapas 1 Definición de Requisitos**

La validación del diseño y la definición de los requisitos funcionales se fundamenta en un enfoque de consulta directa e informal con los usuarios finales, en este caso, el personal de la finca piloto "Villa Rosa". En lugar de emplear encuestas formales, se optó por sostener reuniones de trabajo y conversaciones continuas con los encargados durante las fases iniciales del proyecto.

Este proceso permite identificar de manera orgánica sus necesidades más apremiantes. Una de las conclusiones clave fue la necesidad de una visualización de datos en tiempo real que fuera simple e intuitiva, dado que el encargado no siempre puede estar físicamente presente en los galpones y requiere una herramienta para la supervisión remota. La prioridad, según manifiesta, era contar con un sistema que les permita detectar anomalías (como picos de temperatura o humedad) a través de gráficos claros, en lugar de tablas de datos complejas que exigen un análisis técnico profundo.

Por tanto, el diseño de los prototipos (mockups) se centra en la simplicidad y la accesibilidad, priorizando una interfaz de usuario amigable para productores con diferentes niveles de tecnificación. La selección de la finca Villa Rosa como piloto se justifica por ser una microempresa avícola de la región, lo que permite evaluar el sistema en un entorno real y validar

que la solución responde efectivamente a los desafíos operativos diarios que se identifican durante esta etapa del proyecto. En la tabla 2 se visualiza el resultado final de este proceso.

**Tabla 2**

Definición de Requisitos del Sistema

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RF-001	Funcional	Menú de navegación que contenga los ítems necesarios para consultar las mediciones que se registran a diario de las variables de temperatura, humedad, dióxido de carbono, y material particulado	El menú de cuenta con tres elementos descritos así: temperatura, humedad, carbono, dióxido de carbono y material particulado	Alta	Usuario final

---

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RF-002	Funcional	Visualización de datos referente a las mediciones de temperatura en un día en específico	<p>El Sistema trae los datos desde el servicio API Rest Full de Thingspeak a través de una petición de tipo get al endpoint definido para tal fin.</p> <p>Los datos se visualizan de forma personalizada para que sea agradable para el usuario.</p> <p>Se cuenta con los filtros de fecha de inicio y fecha fin de la medición para poder visualizar el gráfico resultante en ese periodo de tiempo.</p>	Alta	Usuario Final

---

---

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RF-003	Funcional	Visualización de datos referente a las mediciones de carbono en un día en específico	<p>El sistema trae los datos desde el servicio API Rest Full de Thingspeak a través de una petición de tipo get al endpoint definido para tal fin.</p> <p>Los datos se visualizan de forma personalizada para que sea agradable para el usuario.</p> <p>Se cuenta con los filtros de fecha de inicio y fecha fin de la medición para poder visualizar el gráfico resultante en ese periodo de tiempo</p>	Alta	Usuario Final

---

---

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RF-004	Funcional	Visualización de datos referente a las mediciones de Dióxido de carbono en un periodo diario	<p>El sistema trae los datos desde el servicio API Rest Full de Thingspeak a través de una petición de tipo get al endpoint definido para tal fin.</p> <p>Los datos se visualizan de forma personalizada para que sea agradable para el usuario.</p> <p>Se cuenta con los filtros de fecha de inicio y fecha fin de la medición para poder visualizar el gráfico resultante en ese periodo de tiempo</p>	Alta	Usuario Final

---

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RF-005	Funcional	Visualización de datos referente a las mediciones de material particulado en un periodo diario	<p>El sistema trae los datos desde el servicio API Rest Full de Thingspeak a través de una petición de tipo get al endpoint definido para tal fin.</p> <p>Los datos se visualizan de forma personalizada para que sea agradable para el usuario.</p> <p>Se cuenta con los filtros de fecha de inicio y fecha fin de la medición para poder visualizar el gráfico resultante en ese periodo de tiempo</p>	Alta	Usuario Final
RF-006	Funcional	Generación de reportes de medición	El sistema le permitirá generar reportes en forma de archivo de hoja de cálculo Excel con los valores de las mediciones que se registran en rango de fechas escogidas por el	Alta	Usuario final

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RNF-001	No funcional	Plataforma para ejecución en navegadores web.	<p>El sistema corre en diferentes navegadores web como Chrome, Mozilla y Edge.</p> <p>El sistema no depende de ningún sistema operativo para su funcionamiento.</p>	Alta	Usuario Final
RNF-002	No funcional	Plataforma web con cualidades responsive para poderse visualizar desde diferentes dispositivos de acuerdo al tamaño y orientación de su pantalla	El sistema adapta visualmente su interfaz de usuario para que pueda ser utilizada desde diferentes dispositivos con acceso a internet	Alta	Usuario Final
RNF-003	No funcional	Conexión a Internet	Para su funcionamiento el sistema requiere la utilización de una conexión a internet mínima de 10 Mb de ancho de banda.	Alta	Usuario Final

Id	Tipo de requisito	Descripción	Criterios de aceptación	Prioridad	Fuente
RNF-004	No funcional	Interfaz intuitiva para el usuario	El sistema presenta una interfaz intuitiva, de fácil navegación para el usuario final y le permite consultar las variables que se monitorean a través de la etapa de IoT.	Alta	Usuario Final

*Nota.* Lista de requisitos funcionales y no funcionales de la plataforma web

## **Etapa 2 Análisis del Sistema**

En esta etapa describen los niveles de diseño del sistema a desarrollar teniendo en cuenta que para ello se maneja un desarrollo de Alto nivel HLD, donde en primera instancia se describe la arquitectura general del sistema, el comportamiento de los datos y las tecnologías utilizadas en la fase de desarrollo

### **Arquitectura de Software**

Frente a la arquitectura de software se puede mencionar que es una aplicación web que tiene una arquitectura en capas ya que estas permiten “ tener la suficiente independencia para tratarlas como unidades funcionales independientes y las interfaces de sus componentes permite que interactúen de manera significativa y eficiente entre sí” (Cardacci, 2015), De acuerdo esto se tiene una capa de persistencia de datos la cual estará soportada por un servicio del almacenamiento en la nube, seguido de esto se tiene una capa de aplicación encargada de ejecutar

la lógica necesaria para entregar los datos que requiere el usuario para visualizarlos en la capa de la presentación donde este cuenta con una interfaz de usuario amigable y de fácil manejo

Para tener una definición más precisa de los elementos que maneja cada capa de la arquitectura se toman como referencia las definiciones propuestas por Escalante (2013).

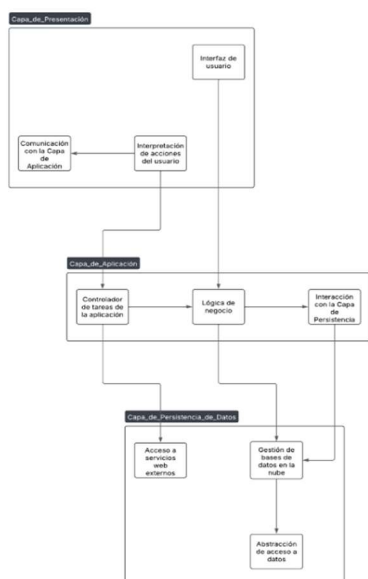
Capa de persistencia de datos: esta capa proporciona la capacidad de persistir datos, así como lógicamente acceder a ellos. Pueden ser datos propios del sistema o incluso acceder a datos expuestos por sistemas externos (Servicios Web externos, etc.).

Capa de Aplicación define los trabajos que la aplicación como tal debe de realizar y redirige a los objetos del dominio y de infraestructura (persistencia, etc.) que son los que internamente deben resolver los problemas.

Capa de presentación esta capa es responsable de mostrar información al usuario e interpretar sus acciones.

### Figura 3

#### Diagrama de Arquitectura de la Aplicación Web



*Nota.* Diagrama de bloques que describe las capas de la aplicación web

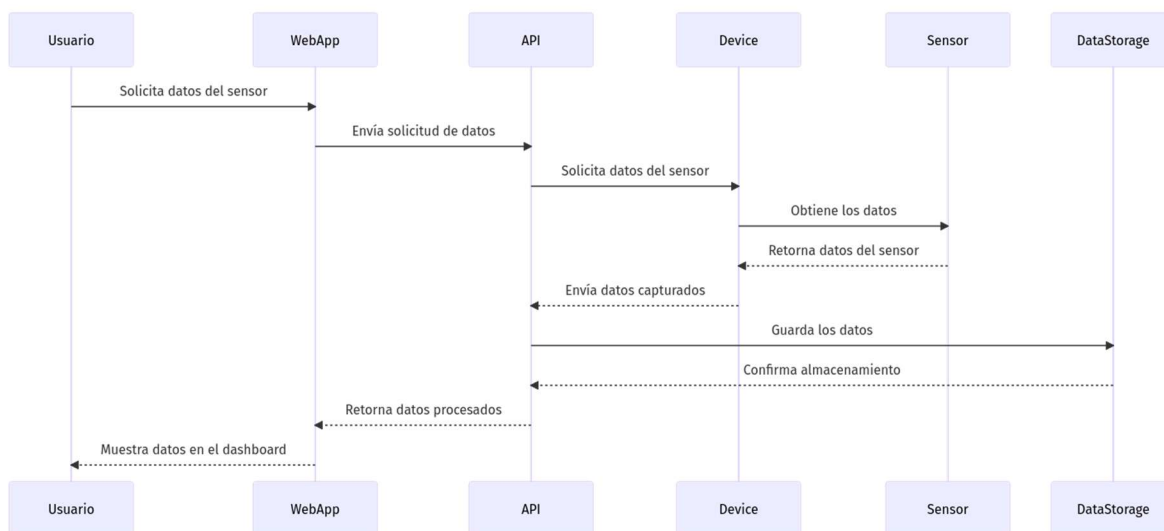
En esta fase de análisis también es importante destacar el diagrama de secuencia en el cual “un diagrama de secuencias modela la interacción entre los objetos de un sistema de software” (Booch et al., 2005) citado en (Vidal, Schmal, Rivero & Villarroel, 2012) adicional a esto los mismos autores mencionan que:

Es relevante indicar que en un diagrama de secuencias existen diferentes tipos de mensajes (Booch et al., 2005): síncronos, asíncronos, plano (sin distinción de sincronía) y mensajes de retorno. En mensajes síncronos, quien lo envía espera por un mensaje de confirmación (para saber si la operación fue exitosa), mientras que, en mensajes asíncronos, quienes los envían no requiere esperar la recepción y confirmación de entrega exitosa.

Teniendo en cuenta esta definición anterior, se presenta el diagrama de secuencia que muestra la interacción de los objetos de la aplicación web con la cual el usuario puede consultar las mediciones que realiza por el dispositivo IoT como se ve en la figura 4.

#### Figura 4

##### *Diagrama de Secuencia de la Plataforma Web*



*Nota.* Diagrama de secuencia que describe la interacción del usuario con el aplicativo web.

En el anterior diagrama se puede ver con claridad cómo a través de la aplicación web que se desarrolla, el usuario puede consultar los datos de las mediciones que realiza por el dispositivo IoT mediante la petición que hace a la API de ThingSpeak que es la encargada de transportar y almacenar los datos en la nube.

En esta misma línea de poder tener en una claridad esquemática y arquitectónica de cómo funciona la aplicación web que utiliza el usuario para poder interactuar con los datos que captura el dispositivo IoT, se presenta el diagrama de casos de uso que de acuerdo a (García, Moreno, García & Velásquez, 2021).

Modela la funcionalidad del sistema tal como la perciben los agentes externos, denominados actores, que interactúan con el sistema desde un punto de vista particular.

Sus componentes principales son:

Sujeto: sistema que se modela.

Casos de uso: unidades funcionales completas.

Actores: entidades externas que interactúan con el sistema

Así pues, en la figura 5 se puede observar el diagrama de casos de uso de la aplicación web a desarrollar.

## Figura 5

### *Diagrama de Casos de Uso del Aplicación Web*



*Nota.* Diagrama de casos de uso que muestra las principales funcionalidades del sistema.

En la anterior figura se puede observar el diagrama de casos de uso de la aplicación web. Dónde se puede evidenciar cómo el usuario tiene acceso a las funciones de consultar los datos que guarda el dispositivo IoT, ya que este dentro del sistema tiene un papel de recibirlos, y adicional se puede observar cómo la plataforma es la encargada de almacenar los datos en la nube para poder ser enviados al usuario.

Con esto se tiene un panorama claro del funcionamiento de la aplicación web desde la comprensión de las capas que la componen, a su cómo sus principales funciones y su flujo de interacción al ser utilizada por el usuario final.

### **Etapa 3: Diseño del Sistema**

En esta etapa, se detalla la interacción entre la aplicación web, el servicio de almacenamiento en la nube y los sensores. Se definen los flujos de datos y la forma en que la información se procesa y presenta al usuario. También se describe cómo el sistema procesa y analiza los datos para proporcionar información útil a los avicultores.

#### ***Flujo de Datos***

**Recopilación de Datos.** Los sensores IoT ubicados en la finca avícola recopilan datos en tiempo real sobre variables ambientales (temperatura, humedad, monóxido de carbono, dióxido de carbono)

**Transmisión de Datos.** Los datos recopilados por los sensores se transmiten de forma inalámbrica a la nube utilizando protocolos de comunicación como MQTT y tecnologías como webSockets.

**Almacenamiento en la Nube.** Los datos se almacenan de forma segura en un servicio de almacenamiento en la nube (por ejemplo, ThingSpeak) para su posterior análisis y visualización.

**Procesamiento y Análisis de Datos.** La aplicación web recupera los datos almacenados en la nube y los procesa utilizando algoritmos y herramientas de análisis de datos. Esto puede incluir la identificación de patrones, tendencias y correlaciones entre las variables ambientales.

**Visualización de Datos.** La aplicación web presenta los datos procesados y analizados al usuario a través de gráficos, tablas y paneles interactivos. Esto permite a los avicultores visualizar y comprender fácilmente la información relevante para la gestión de su finca.

**Interacción con el Usuario.** La aplicación web proporciona una interfaz intuitiva y fácil de usar que permite a los avicultores interactuar con el sistema.

Los usuarios pueden seleccionar las variables que desean monitorear, establecer umbrales de alerta y generar informes personalizados.

La aplicación también puede proporcionar recomendaciones basadas en el análisis de datos, ayudando a los avicultores a tomar decisiones informadas para optimizar el consumo energético y mejorar la productividad.

**Análisis de Datos.** El sistema puede analizar los datos recopilados para identificar patrones de consumo energético, detectar anomalías y predecir posibles fallas en los equipos.

También puede evaluar la eficiencia de las variables ambientales de la microempresa avícola y sugerir medidas para mejorarla.

El análisis de datos también puede ayudar a los avicultores a comprender cómo las variables ambientales afectan la salud y el rendimiento de las aves, permitiéndoles ajustar las condiciones de la finca para optimizar la producción.

### ***Beneficios para el Usuario***

**Monitoreo en Tiempo Real.** Los avicultores pueden acceder a información actualizada sobre las condiciones de su finca en cualquier momento y desde cualquier lugar.

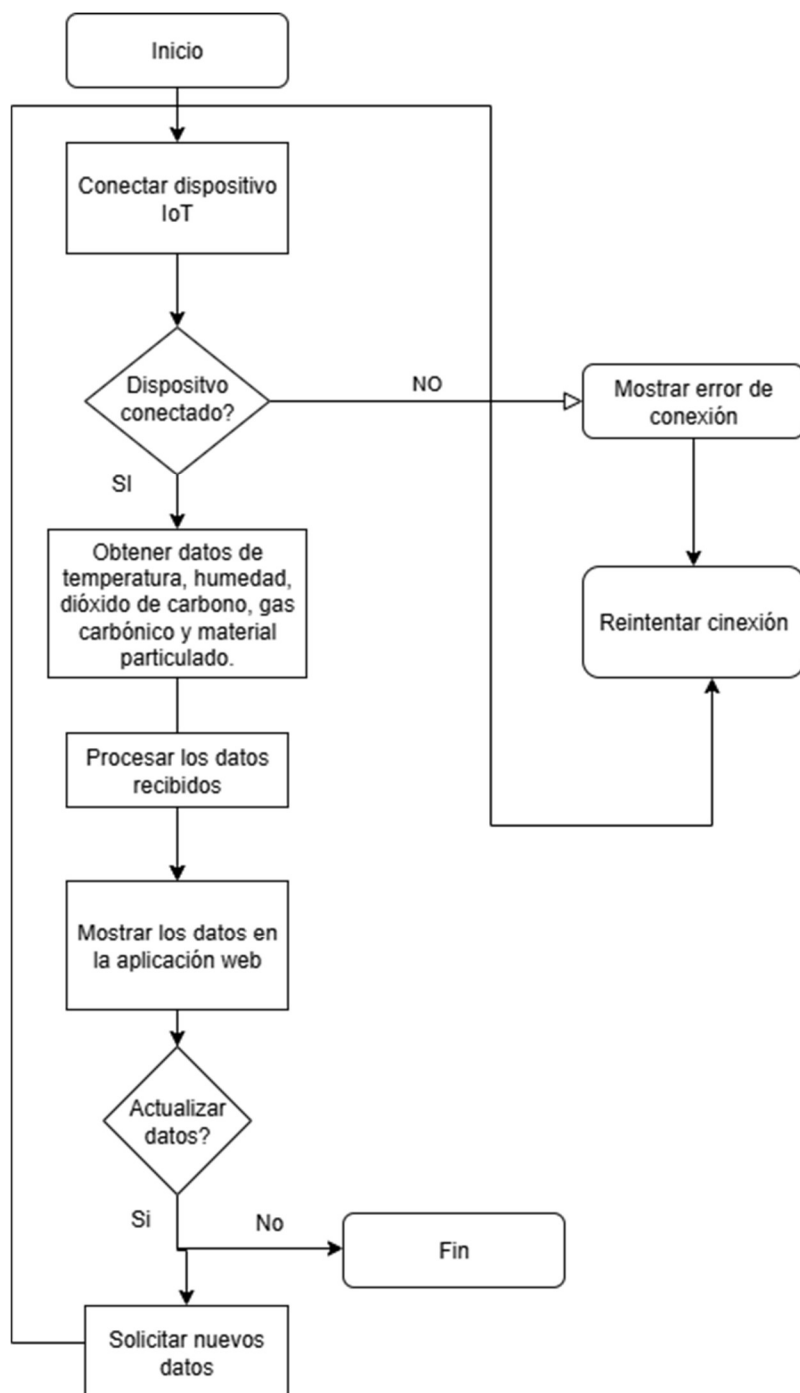
**Toma de Decisiones Informadas.** El análisis de datos y las recomendaciones proporcionadas por el sistema permiten a los avicultores tomar decisiones más informadas y eficientes.

**Optimización del Consumo Energético.** El sistema ayuda a identificar oportunidades para reducir el consumo energético y los costos asociados.

**Mejora de la Productividad.** Al monitorear y controlar las variables ambientales, los avicultores pueden mejorar la salud y el rendimiento de las aves, lo que se traduce en una mayor productividad.

**Sostenibilidad.** La optimización del consumo energético y el uso eficiente de los recursos contribuyen a una producción avícola más sostenible.

La descripción anterior se puede ver descripción anterior se puede ver de una forma más resumida en el diagrama de flujo de datos de la aplicación web que se muestra en la figura 6.

**Figura 6***Diagrama de Flujo de Datos de la Aplicación*

*Nota.* Diagrama de flujo de datos del aplicativo web.

De acuerdo con la anterior figura se puede ver como fluyen los datos desde el momento que el usuario solicita su consulta visualización a través de la aplicación web que se comunica con el dispositivo IoT de acuerdo a la variable medida.

### **Prototipos de Interfaces de la Aplicación Web**

En este punto del ciclo de desarrollo de software es importante realizar una serie de modelos conocidos como mockups que de una visión de los elementos que conformarán la interfaz de usuario de la aplicación web. En palabras de Lozada (2021) “es el proceso empleado por diseñadores para la creación de interfaces o pantallas de un producto –mayormente páginas web o aplicaciones móviles– enfocado en el aspecto visual y estético”.

A partir de esta definición se presenta en la figura 7 la interfaz de la página principal de la aplicación web a desarrollar.

## Figura 7

### *Página Principal Aplicación Web*



*Nota.* Mockup de la página principal de la aplicación web

En la figura anterior se puede observar un mockup de cómo será la interfaz de usuario de la aplicación web en su página principal, allí se observa que el usuario cuenta con un menú vertical donde se encuentra cada uno de los módulos de visualización de las mediciones de las variables capturadas por el dispositivo IoT. Adicional se puede ver que en la página principal el usuario encontrará el nombre de la aplicación la cual es “SMART FARMING”, junto a ello el usuario encuentra una descripción de la función principal de la webapp y unas imágenes alusivas a la actividad agrícola o pecuaria.

Ahora en la figura 8 se puede observar el mockup del módulo donde el usuario puede ver las mediciones que se registran de temperatura.

## Figura 8

### *Filtro de Módulo de Medición de Temperatura*



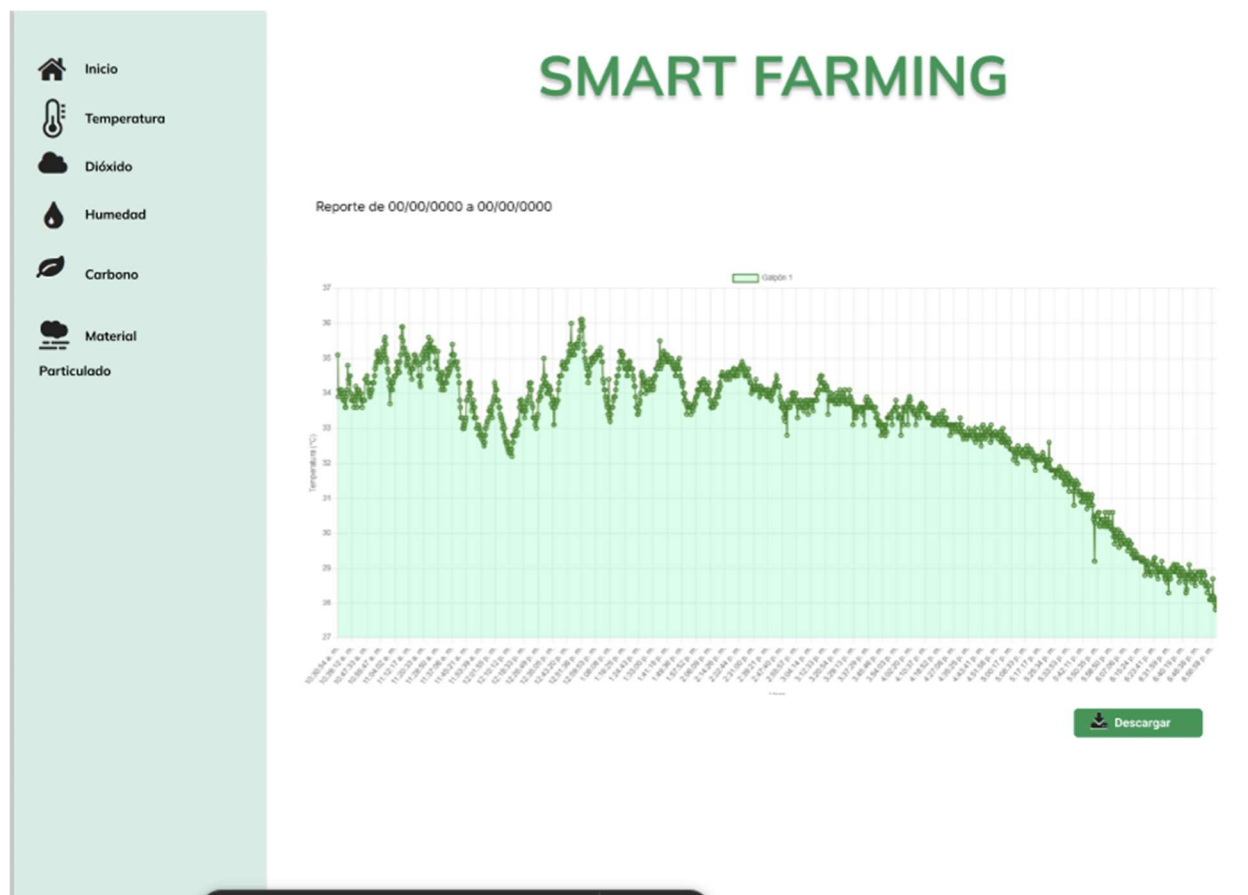
*Nota.* Mockup de filtro para consultar las temperaturas que se registran en el aplicativo web

En esta figura se puede observar cómo el usuario puede a través de la interfaz, seleccionar el rango de fechas por días, para observar los registros de medición en los días seleccionados.

El mockup de cómo el usuario va a poder ver el resultado de las mediciones para la variable de temperatura se puede observar en la figura 9.

Figura 9

## Visualización de Mediciones de Temperatura



*Nota.* Mockup de visualización de temperatura en el aplicativo web.

En la figura anterior se puede observar cómo el usuario luego de seleccionar el filtro de fecha puede visualizar a través de una gráfica las mediciones obtenidas en el rango de esos días y adicional a esto contará con un botón que le permitirá descargar el reporte de los registros en formato en Excel para analizarlos más a detalle.

A continuación, en la figura 10 se puede ver el prototipo de interfaz donde el usuario puede seleccionar el filtro de las fechas sobre las cuales quiere consultar las mediciones del dióxido de carbono.

**Figura 10**

*Filtro de Módulo de Medición del Nivel de Dióxido de Carbono*

The image shows a web application interface for 'SMART FARMING'. On the left is a vertical navigation menu with icons and labels: Inicio, Temperatura, Dióxido, Humedad, Carbono, Material, and Particulado. The main content area has the title 'SMART FARMING' in green, followed by the instruction 'Consulte las medidas registradas del Dióxido en su galpón.' Below this is a prompt 'Seleccione la fecha para consultar el dióxido'. There are two date input fields: 'Fecha de inicio:' and 'Fecha de fin:', both with a placeholder 'dd/mm/aaaa' and a calendar icon. To the right of these fields is a green button labeled 'Consultar'.

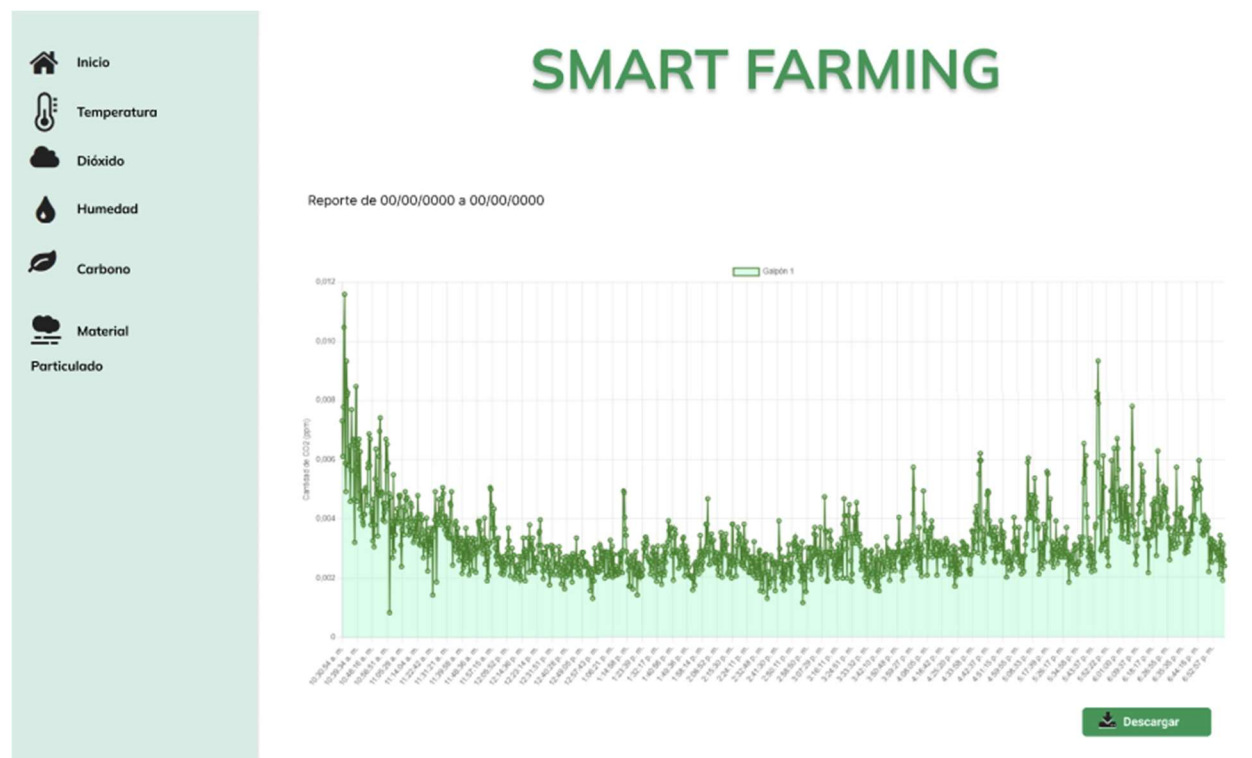
*Nota.* Mockup de filtro para consultar las medidas de dióxido de carbono que se registran en el aplicativo web.

En esta figura se puede observar cómo a través de la interfaz el usuario puede seleccionar los días sobre los cuales quiere consultar los registros de medición capturados por el dispositivo IoT respecto al nivel de dióxido de carbono.

Dentro de este mismo módulo en la figura 11 se puede observar la visualización de resultados de la medición de acuerdo con el filtro aplicado por el usuario.

## Figura 11

### Visualización de Mediciones de Nivel de Dióxido de Carbono



*Nota.* Mockup de visualización de las medidas de dióxido de carbono que se registran en el aplicativo web.

En la vista que muestra esta figura se puede observar la gráfica en la cual el usuario puede observar las mediciones de nivel de dióxido de carbono que se registran por el dispositivo IoT.

Siguiendo con la fase de diseño en la figura 12 se muestra el filtro de fechas que el usuario puede aplicar para consultar las mediciones de humedad que se registran por el dispositivo IoT para ser visualizadas a través de la interfaz de usuario.

**Figura 12***Filtro de Módulo de Medición de Nivel de Humedad*

The image shows a web application interface for 'SMART FARMING'. On the left is a vertical navigation menu with icons and labels: Inicio, Temperatura, Dióxido, Humedad, Carbono, Material, and Particulado. The main content area has the title 'SMART FARMING' in green, followed by the text 'Consulte las medidas registradas de la Humedad en su cultivo.' Below this is the instruction 'Seleccione la fecha para consultar la humedad'. There are two date input fields: 'Fecha de inicio:' and 'Fecha de fin:', both with placeholder text 'dd/mm/aaaa' and a calendar icon. To the right of these fields is a green button labeled 'Consultar'.

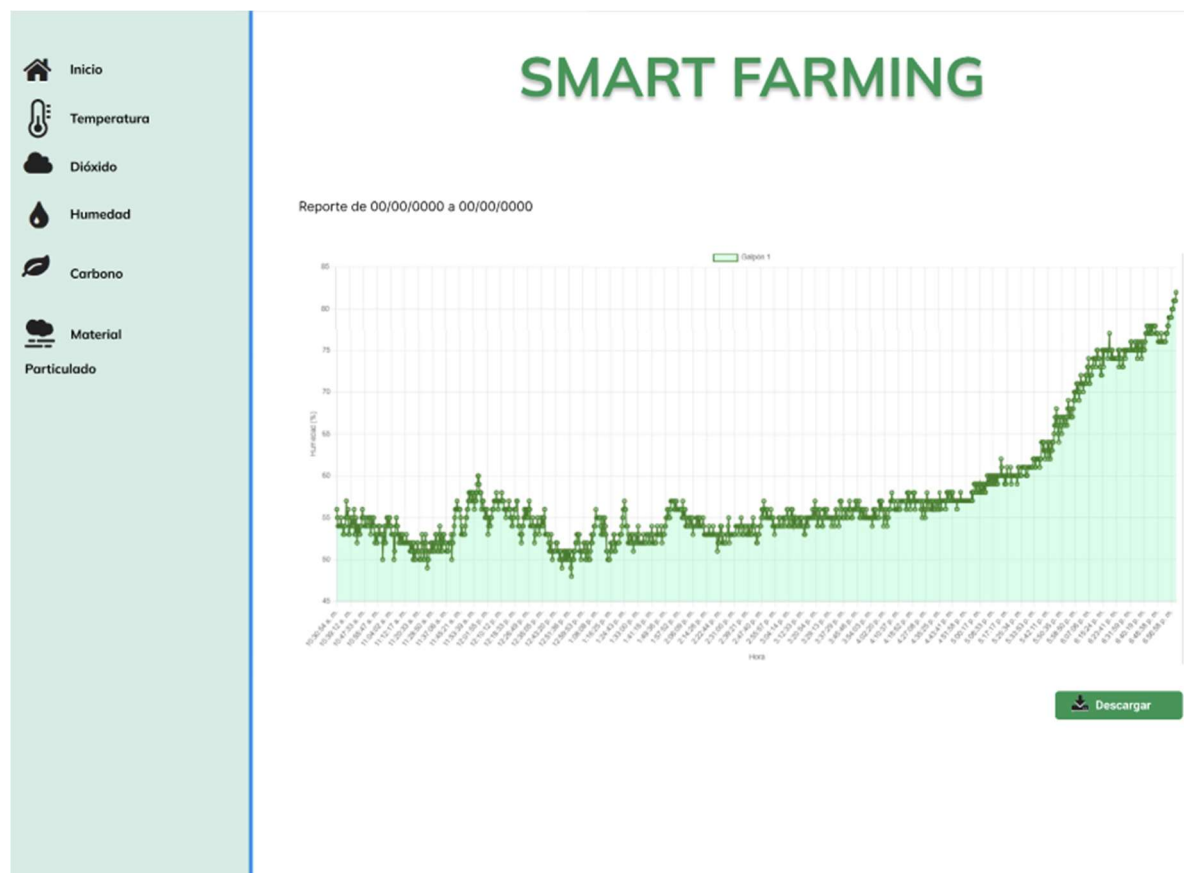
*Nota.* Mockup de filtro para consultar las medidas de humedad que se registran en el aplicativo web.

En la figura anterior se puede observar el mockup del módulo de luminosidad donde el usuario puede aplicar un filtro a través de un rango de fechas sobre el cual desea consultar las mediciones respecto a la variable en mención.

Luego de observar la vista de selección de filtro, en la figura 13 se observa la vista de la gráfica generada para que el usuario pueda visualizar las mediciones de humedad.

**Figura 13**

*Visualización de Mediciones de Nivel de Humedad*



*Nota.* Mockup de visualización de las medidas de dióxido de carbono que se registran en el aplicativo web.

En esta figura se muestra el mockup de cómo el usuario a través de la interfaz puede visualizar el comportamiento de las mediciones de la variable de humedad que realiza por el dispositivo IoT de acuerdo al filtro de días seleccionado.

Los mockups del penúltimo módulo de la aplicación web se presentan de la siguiente manera: 1) en la figura 14 se muestra la sección de filtro que puede realizar el usuario para consultar, las mediciones que se registran de la variable de carbono, 2) en la figura 15 se puede

observar las gráficas que el usuario visualizará con los registros de las mediciones de gas metano luego de aplicado los filtros.

## Figura 14

### *Filtro de Módulo de Medición de Nivel de Carbono*

SMART FARMING

Consulte las medidas registradas del carbono en su galpón.

Seleccione la fecha para consultar la carbono

Fecha de inicio:

Fecha de fin:

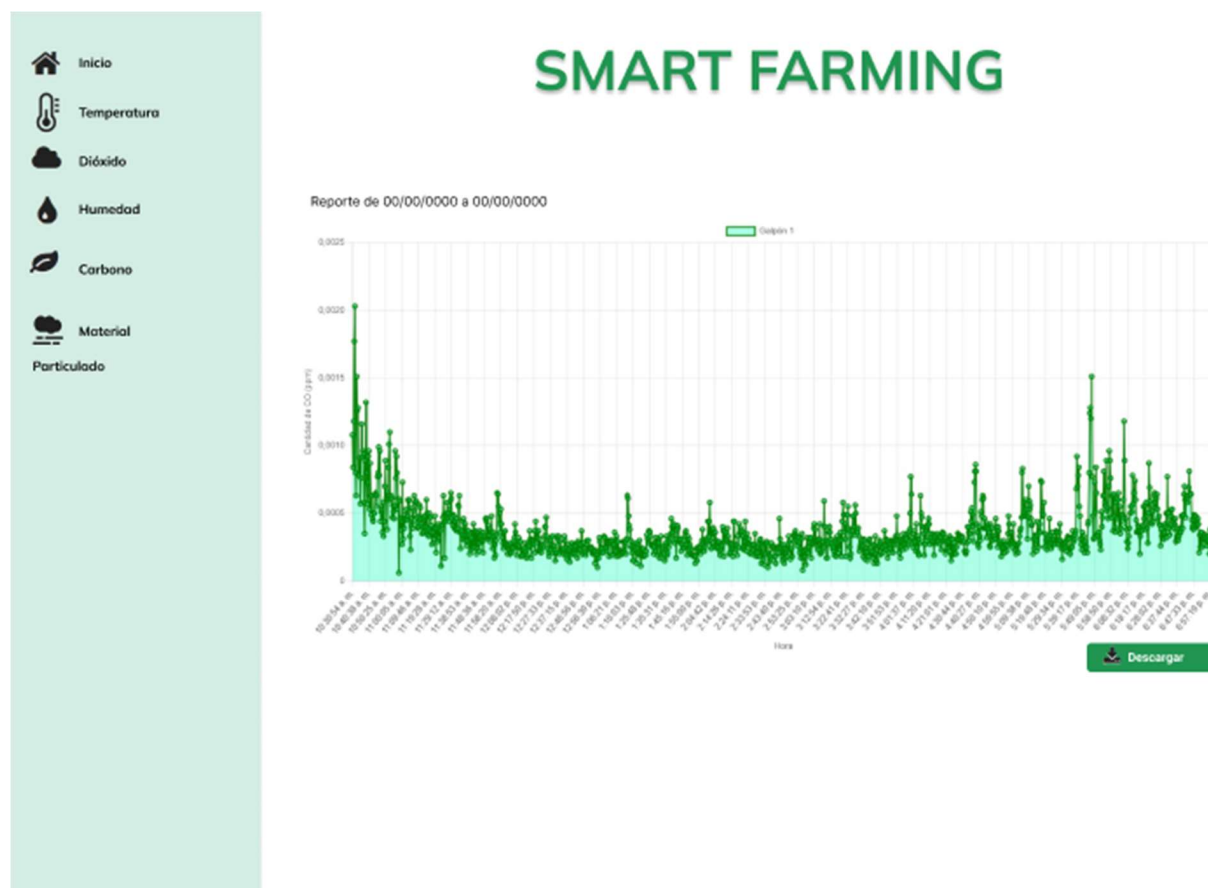
El mockup muestra una interfaz web con un menú lateral de navegación que incluye: Inicio, Temperatura, Dióxido, Humedad, Carbono (seleccionado), Material y Particulado. El contenido principal muestra el título 'SMART FARMING', una instrucción para consultar las medidas de carbono, un campo de texto para seleccionar la fecha, y un botón 'Consultar'.

*Nota.* Mockup de filtro para consultar las medidas de carbono que se registran en el aplicativo web

En esta figura se puede observar el prototipo de la interfaz donde el usuario puede seleccionar los filtros para consultar los valores que se miden de carbono de acuerdo a la fecha escogida.

Figura 15

Visualización de Mediciones de Nivel de Carbono



Nota Mockup de visualización de las medidas de dióxido de carbono que se registran en el aplicativo web

El último mockup de la fase de diseño muestra en la figura 16 los filtros que puede seleccionar el usuario para consultar las fechas de medición del material particulado y la figura 17 muestra la gráfica resultante que muestra el comportamiento de las mediciones.

**Figura 16***Filtros para Consultar Mediciones del Nivel de Material Particulado*

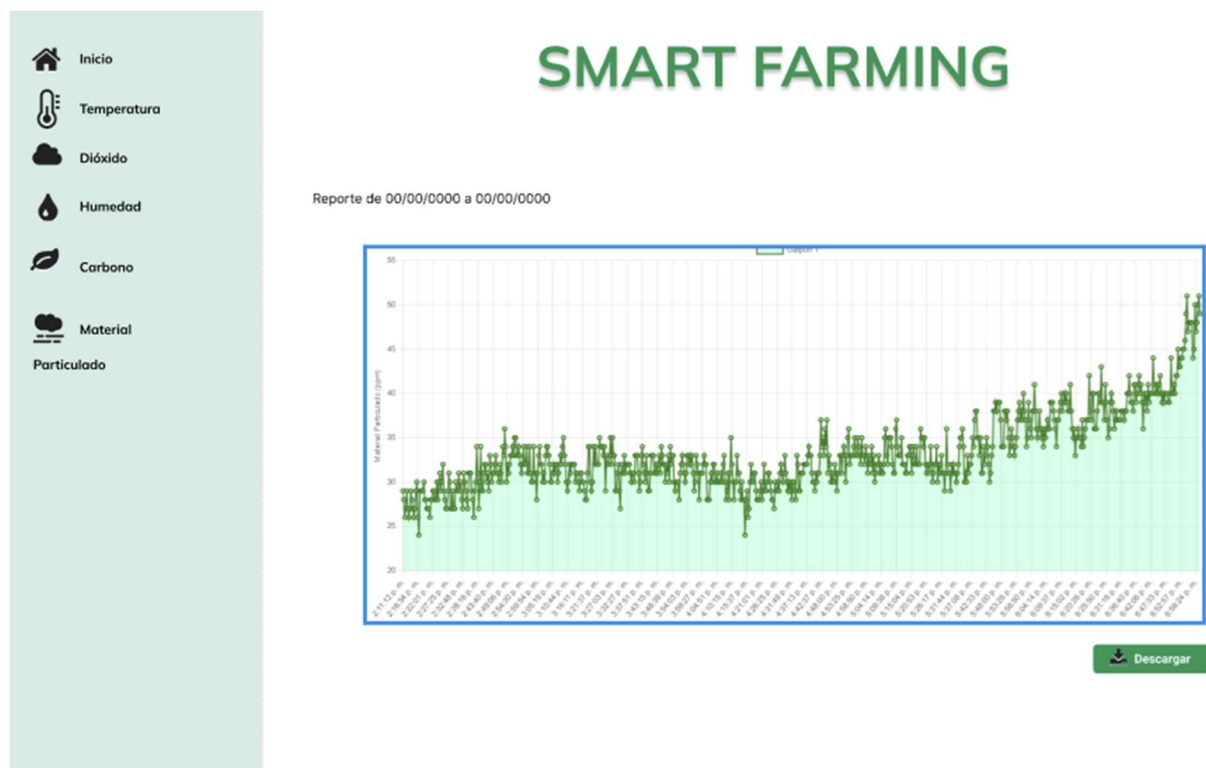
The image shows a web application interface for 'SMART FARMING'. On the left, there is a vertical sidebar with a light green background containing navigation icons and labels: 'Inicio' (home), 'Temperatura' (temperature), 'Dióxido' (dioxide), 'Humedad' (humidity), 'Carbono' (carbon), 'Material', and 'Particulado' (particulate matter). The main content area has the title 'SMART FARMING' in green. Below the title, it says 'Consulte las medidas registradas del material particulado en su galpón.' (Consult the recorded measurements of particulate matter in your warehouse). There are two date input fields: 'Fecha de inicio:' (start date) and 'Fecha de fin:' (end date), both with a placeholder 'dd/mm/aaaa' and a calendar icon. To the right of these fields is a green button labeled 'Consultar' (Consult).

*Nota.* Mockup de filtro para consultar las medidas de material particulado que se registran en el aplicativo web

En esta figura se puede observar el prototipo de la interfaz donde el usuario puede seleccionar los filtros para consultar los valores que se miden de material particulado de acuerdo a la fecha escogida.

**Figura 17**

*Visualización de las Mediciones de Material Particulado*



*Nota.* Mockup de visualización de las medidas de material de carbono que se registran en el aplicativo web

Así pues, se completa la fase del diseño del sistema ya que se tienen diversas vistas de la aplicación desde una perspectiva estática, dinámica y de interfaz de usuario.

#### **Etapa 4: Integración de la Plataforma Digital**

En esta etapa, se describe como la plataforma web se integra al hardware del dispositivo IoT para entregar la información de las variables ambientales medidas al usuario final.

## Herramientas para el Desarrollo de la Aplicación Web

Para afrontar el desarrollo de la aplicación web propuesta se utiliza un editor de código, lenguaje de programación, y librerías para el desarrollo de funciones especiales y complejas que necesita la aplicación de acuerdo a los requerimientos establecidos. El listado de herramientas a utilizar se puede ver en la tabla 3.

**Tabla 3**

Herramientas utilizadas para la fase de desarrollo

Herramienta	Descripción	Utilidad
Editor de código	Visual Studio Code	Es un editor que sirve para escribir código en diferentes lenguajes de programación de acuerdo a las necesidades requeridas del programa o aplicación a desarrollar
Lenguaje	Python	Es un lenguaje de programación que sirve para desarrollar aplicaciones diferentes dispositivos como computadoras, desarrollo web y dispositivos móviles, adicionalmente es ampliamente usado en disciplinas como el análisis y la ciencia de datos.
Framework	FastApi	Es un framework que permite desarrollar aplicaciones web en basadas en lenguaje Python y permite su combinación con tecnologías como HTML, CSS y JavaScript

Herramienta	Descripción	Utilidad
Lenguaje	HTML 5	“HTML (Lenguaje de Marcas de Hipertexto, del inglés HyperText Markup Language) es el componente más básico de la Web. Define el significado y la estructura del contenido web” (Mozilla,2024)
Hojas de estilo	CSS3	“CSS describe cómo debe ser renderizado el elemento estructurado en la pantalla, en papel, en el habla o en otros medios” (Mozilla,2024).
Lenguaje	JavaScript	“JavaScript (JS) es un lenguaje de programación ligero, interpretado, o compilado justo-a-tiempo (just-in-time) con funciones de primera clase. Si bien es más conocido como un lenguaje de scripting (secuencias de comandos) para páginas web” (Mozilla,2024)
Framework	React Native	Es un framework que permite desarrollar aplicaciones móviles para Android y IOS usando JavaScript basado en react.

*Nota.* Lista de herramientas a utilizar en la fase de desarrollo, enfatizando su descripción y utilidad.

Durante el desarrollo del sistema se implementa una plataforma web como interfaz de comunicación entre los sensores IoT y los usuarios finales. Esta herramienta se diseña con el propósito de garantizar una visualización clara, en tiempo real, de las variables ambientales críticas dentro del galpón (temperatura, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, CO y material particulado).

Es importante resaltar que los fragmentos de código y aspectos técnicos de programación no se incluyen en este capítulo, ya que su nivel de detalle resulta más viable en un anexo técnico. En dicho anexo se documenta la estructura del código, librerías empleadas y procedimientos de compilación, lo que permite a los interesados en la parte informática reproducir la solución si así lo desean.

## **Evaluación del Desempeño del Sistema de Monitoreo de Variables Ambientales en una Microempresa Piloto**

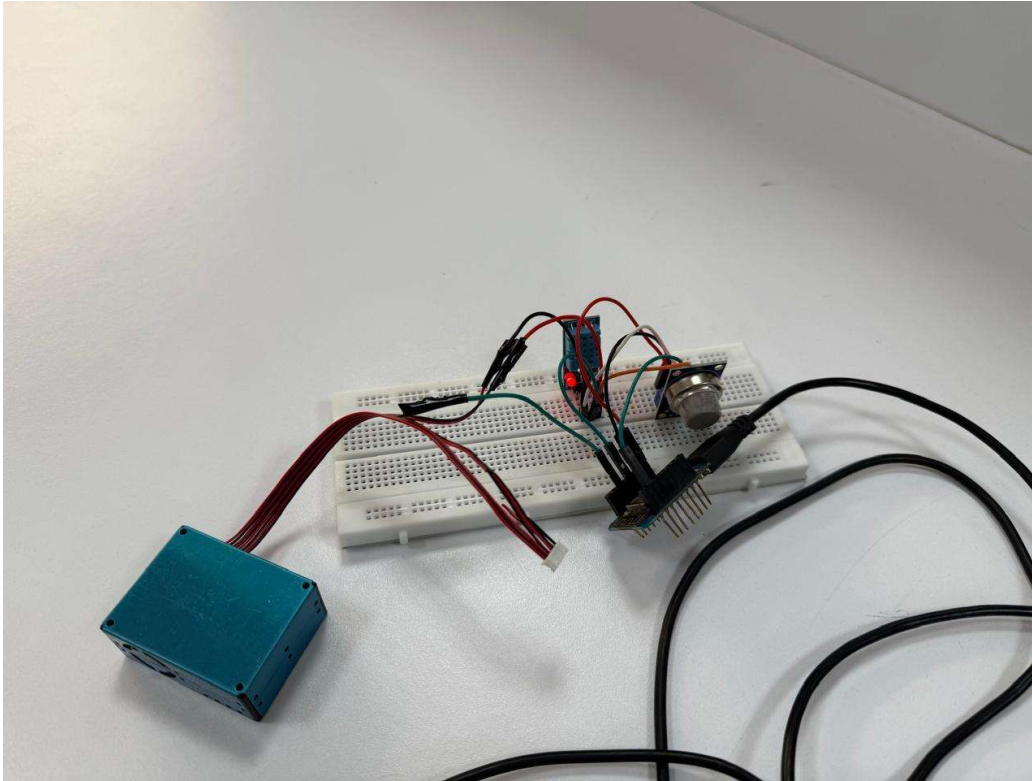
Este apartado tiene el propósito de describir el proceso de implementación del dispositivo IoT y su evaluación frente a las variables medidas en una finca que se dedica a la avicultura. Esto a través de un proceso descriptivo que da cuenta del montaje del dispositivo IoT, la puesta en marcha del mismo y el análisis de las mediciones obtenidas frente a las variables ambientales antes mencionadas y su incidencia en las aves que se encuentran en proceso de cría.

### **Alistamiento y Montaje del Dispositivo en el Laboratorio**

Para empezar este proceso se realiza en el laboratorio de innovación y electrónica de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, sede Acacias.

Ya hablando del montaje del circuito en la placa de pruebas se puede decir lo siguiente:

El Wemos D1 Mini, alimentado por USB, actúa como centro de control y distribuye la alimentación (VCC/GND) a través de las líneas de la protoboard hacia los tres sensores conectados: el DHT (temperatura/humedad), el MQ (gas) y el PM (partículas). Para la comunicación de datos, el sensor DHT se conecta a un pin digital (Dx) del Wemos, el sensor MQ probablemente utiliza la entrada analógica (A0) para enviar sus lecturas, y el sensor de partículas PM se comunica con el Wemos mediante los pines de comunicación serie UART (TX/RX). El montaje descrito anteriormente se puede observar en la figura 18.

**Figura 18***Montaje en Placa de Pruebas de Dispositivo IoT*

*Nota.* Montaje de laboratorio del dispositivo IoT para la captura y monitoreo de variables ambientales.

En esta figura se puede visualizar el montaje terminado del dispositivo IoT, con cada uno de sus componentes de hardware de acuerdo con la arquitectura establecida.

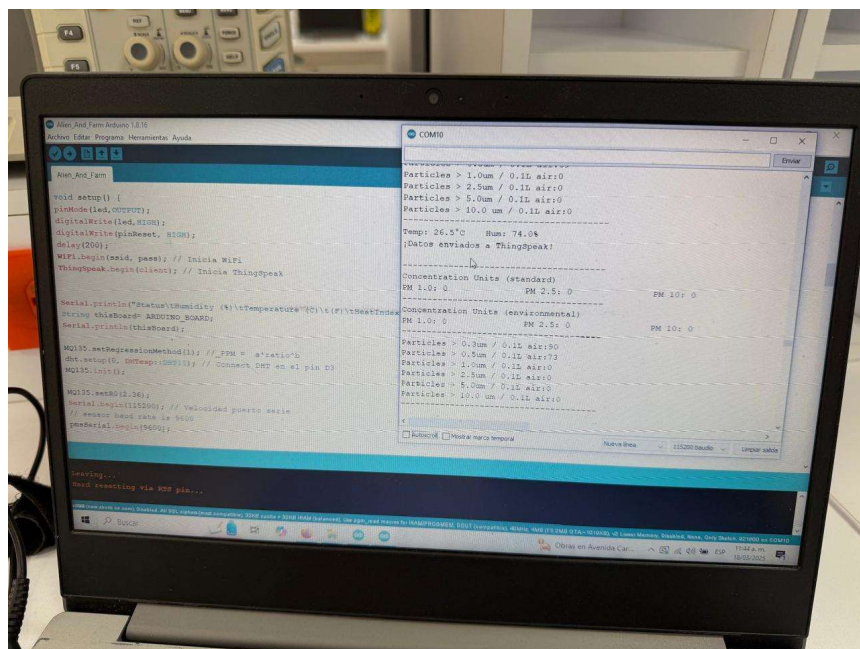
Una vez se tiene listo el montaje se procede a programar el módulo microcontrolador ESP que de acuerdo con (Lara, Velásquez, Herrera, Guillen & Bautista, 2021) “La conexión facilita la interacción con el dispositivo, haciendo que sea accesible para usuarios con diferentes niveles”.

Este se programa a través de lenguaje C++ que se caracteriza por ser muy veloz en la ejecución de diferentes algoritmos especialmente los que interactúan con componentes electrónicos.

En la figura 19 se muestra una imagen del código escrito para programar la captura de datos y conexión con los diferentes sensores del módulo Wemos D1 Mini.

**Figura 19**

*Codificación Controlador ESP8266EX*



*Nota.* Desarrollo de la codificación del módulo ESP8266 para la captura de datos del dispositivo IoT

De la figura anterior se puede mencionar que el código que se le graba al microcontrolador ESP8266EX para que sepa cosas como cada cuanto debe tomar datos de los diferentes sensores y trasladarlos a la plataforma ThinkSpeak, a su vez a través de esta codificación puede saber a qué red wifi está conectado

## **Instalación del Sistema en la Microempresa Avícola como Prueba Piloto**

Luego de realizar el montaje en laboratorio del dispositivo, el día 15 de marzo se instalan dos prototipos del dispositivo IoT, dentro de dos galpones de la microempresa finca Villa Rosa que corresponden a los sitios de prueba como se ven en las figuras 20 y 21 respectivamente.

### **Figura 20**

#### *Dispositivo IoT Instalado el Galpón 1*



*Nota.* Evidencia fotográfica de la instalación del dispositivo IoT en el galpón 1

En esta figura se puede ver como el dispositivo IoT ya está montado en el galpón 1 de prueba y es protegido por unas cajas que han sido diseñadas e impresas de acuerdo con el tamaño y volumen que ocupan los componentes.

**Figura 21***Dispositivo IoT Instalado en el Galpón 2*

*Nota.* Evidencia fotográfica de la instalación del dispositivo IoT en el galpón 2

Nuevamente en esta figura se evidencia el otro prototipo de dispositivo IoT instalado en el segundo galpón con su respectiva caja protectora.

Posterior a la instalación de los dispositivos en cada uno de los galpones se inicia un registro diario de las menciones de cada una de las variables ambientales mencionadas más arriba, logrando así la consolidación de 2 tablas de datos que contienen los datos capturados desde el 15 de marzo al 30 de junio del 2025 tal y como se puede ver en la figura 43.

**Figura 22**

*Registro de Datos Capturados por el Dispositivo IoT Instalado*

created_at	consecutivo	PM1 Estandar	PM2,5 Estandar	PM10 Estandar	CO	CO2	Acetona	Humeda	Temperatura
15/03/2025 12:00	1	29	56	191	0,00643	0,02676	0,00192	71	20,2
15/03/2025 12:00	2	26	51	205	0,00537	0,02349	0,00165	71	20,2
15/03/2025 12:00	3	30	52	66	0,00603	0,02555	0,00182	71	20,1
15/03/2025 12:01	4	29	52	60	0,00558	0,02416	0,0017	71	20,1
15/03/2025 12:01	5	31	51	60	0,00537	0,02349	0,00165	71	19,9
15/03/2025 12:01	6	28	52	57	0,00573	0,02462	0,00174	71	20,2
15/03/2025 12:02	7	28	46	58	0,00588	0,02508	0,00178	72	21
15/03/2025 12:02	8	27	46	55	0,00537	0,02349	0,00165	71	20,2
15/03/2025 12:02	9	30	52	61	0,0053	0,02327	0,00163	71	20,1
15/03/2025 12:03	10	29	55	65	0,00517	0,02283	0,00159	71	20,2
15/03/2025 12:03	11	28	50	60	0,00537	0,02349	0,00165	71	20,1
15/03/2025 12:04	12	29	48	57	0,0053	0,02327	0,00163	71	20,3
15/03/2025 12:04	13	30	48	58	0,00517	0,02283	0,00159	71	20
15/03/2025 12:04	14	28	45	62	0,00484	0,02176	0,00151	71	20,2
15/03/2025 12:05	15	27	49	58	0,00459	0,02094	0,00144	71	20,1
15/03/2025 12:05	16	31	52	66	0,00447	0,02054	0,00141	71	19,9
15/03/2025 12:05	17	28	52	65	0,00497	0,02219	0,00154	71	20
15/03/2025 12:06	18	28	55	73	0,00441	0,02034	0,00139	71	20,1
15/03/2025 12:06	19	30	51	65	0,00459	0,02094	0,00144	71	19,9
15/03/2025 12:06	20	29	50	62	0,00282	0,01471	0,00095	71	19,8
15/03/2025 12:07	21	27	47	65	0,00418	0,01956	0,00133	71	20
15/03/2025 12:07	22	27	44	56	0,00412	0,01937	0,00131	71	19,9
15/03/2025 12:08	23	27	44	50	0,00453	0,02074	0,00142	71	20
15/03/2025 12:08	24	27	46	55	0,00459	0,02094	0,00144	71	20,1
15/03/2025 12:08	25	26	45	54	0,00447	0,02054	0,00141	71	19,8
15/03/2025 12:08	26	26	43	52	0,00401	0,01899	0,00128	71	19,9
15/03/2025 12:09	27	24	44	54	0,00401	0,01899	0,00128	72	19,9
15/03/2025 12:09	28	27	45	57	0,00453	0,02074	0,00142	72	19,9
15/03/2025 12:10	29	28	49	71	0,00441	0,02034	0,00139	73	21,1
15/03/2025 12:10	30	27	47	66	0,00406	0,01918	0,0013	71	20,1
15/03/2025 12:11	31	27	46	61	0,00278	0,01456	0,00094	71	20
15/03/2025 12:11	32	27	45	58	0,00395	0,0188	0,00127	71	19,9
15/03/2025 12:11	33	27	48	61	0,00418	0,01956	0,00133	71	19,9
15/03/2025 12:12	34	26	44	60	0,00395	0,0188	0,00127	71	19,8
15/03/2025 12:12	35	25	43	58	0,00395	0,0188	0,00127	72	20
15/03/2025 12:12	36	26	45	60	0,00395	0,0188	0,00127	72	20
15/03/2025 12:13	37	28	48	65	0,00447	0,02054	0,00141	72	20

*Nota.* Evidencia del registro de los datos capturados en uno de los galpones

En la figura anterior se puede observar el registro de los datos capturados por el dispositivo IoT instalado en el galpón 1, respecto a cada una de las variables ambientales sometidas a medición.

Luego de los tres meses de medición y registros se pueden mencionar los siguientes resultados para cada uno de los galpones de prueba.

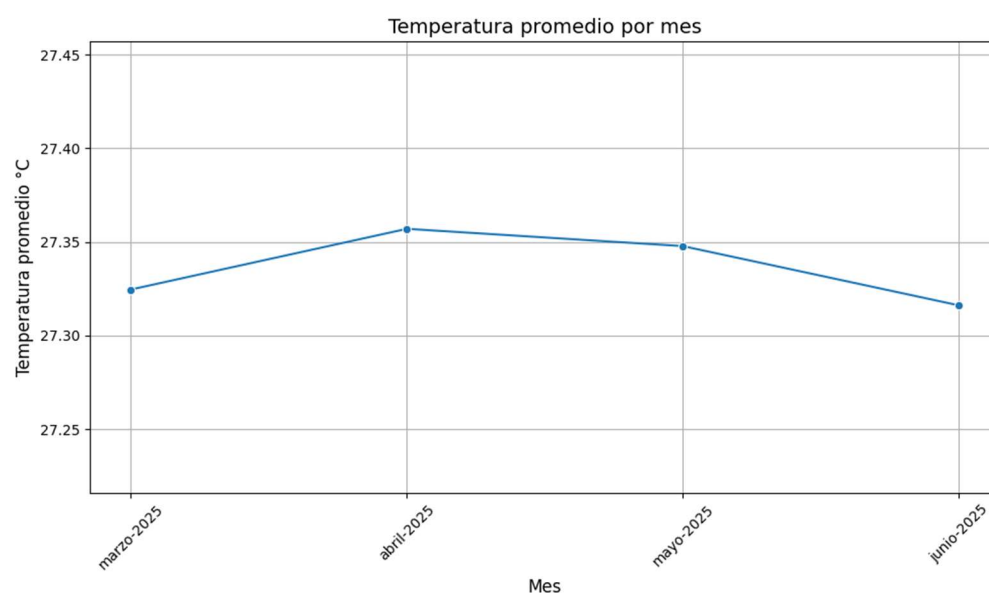
## Análisis de Variables Ambientales Capturadas en el Galpón 1

Posterior al proceso de captura que se desarrolla se pueden destacar los siguientes resultados:

Se realiza un análisis de la temperatura promedio registrada durante los meses que se capturaron los datos y los resultados se pueden ver en la figura 23.

### Figura 23

*Temperatura Promedio Registrada en el Galpón 1*



*Nota.* Promedio de temperatura registrada en los meses bajo medición.

Según el gráfico, la temperatura promedio mensual del Galpón 1 entre marzo y junio de 2025 se mantiene prácticamente plana alrededor de 27.3 °C: marzo 27.32 °C, abril 27.36 °C, mayo 27.35 °C y junio 27.32 °C. Esa estabilidad sugiere un control ambiental consistente y una operación de ventilación/calefacción que no varía de forma apreciable entre meses. Sin embargo, un promedio mensual tan estable no describe la dinámica diaria ni por edad del lote, y puede enmascarar mínimos nocturnos o máximos diurnos relevantes para el confort térmico.

La idoneidad de 27–27.4 °C depende fuertemente de la edad. Para pollitos en primera semana, la diana a nivel de ave suele iniciar en 32–33 °C, por lo que un promedio de 27 °C indicaría infra calefacción si ese mes corresponde mayormente al arranque. En semanas 2–3, 27 °C puede estar dentro o ligeramente por encima del rango según la ventilación y la humedad.

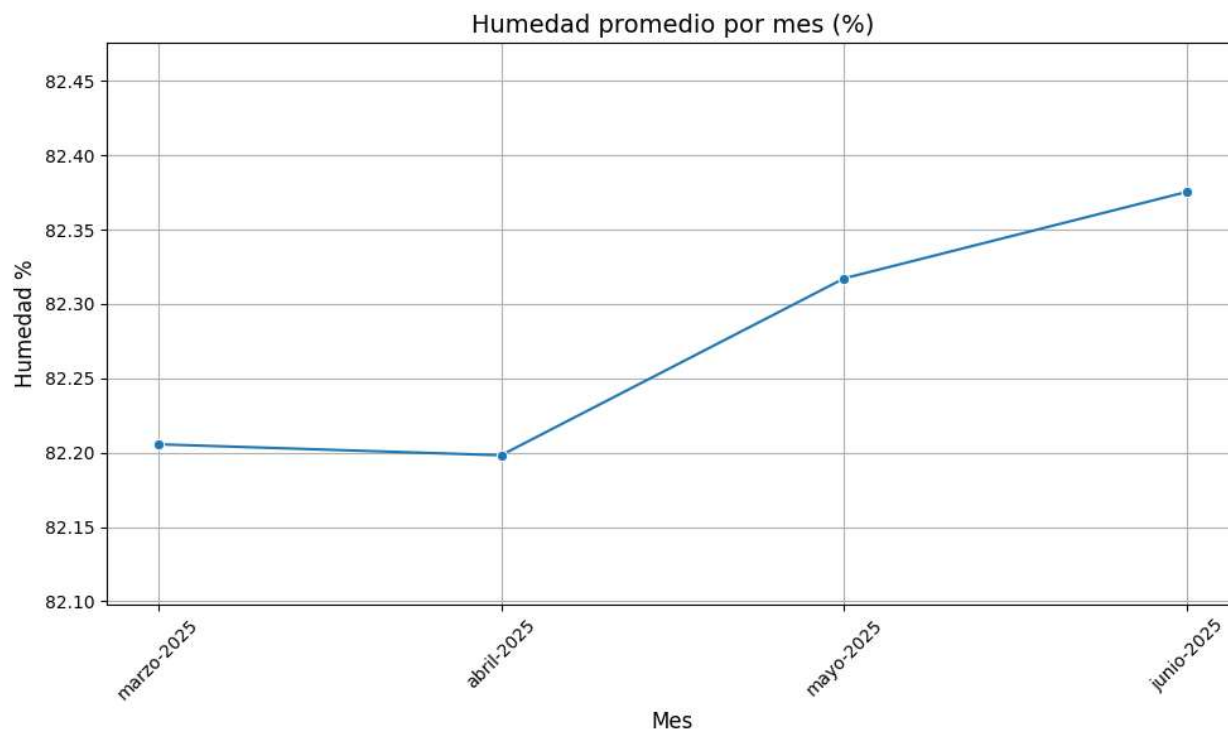
Se observan meses con temperaturas por encima de 28 °C, especialmente en aves mayores de 3 semanas, se puede estar ante un riesgo de estrés por calor. Por otro lado, si hay meses con temperaturas por debajo de 21 °C, especialmente en las primeras semanas de vida, podría haber riesgo de estrés por frío, lo que también afecta negativamente el desarrollo.

En el Galpón 1 la temperatura ambiental durante prácticamente todos los días supera el rango de confort recomendado ( $\approx 18\text{--}24^\circ\text{C}$ , para pollos de engorde de más de 4 semanas. Especialmente en horas del mediodía y la tarde mostró variaciones diarias marcadas, con mínimas alrededor de  $\sim 20^\circ\text{C}$  y picos hasta  $36.6^\circ\text{C}$ . estos picos, lo cual puede causar estrés calórico, sofocación y bajo rendimiento en las aves bajo crianza.

Para las horas de la noche, la temperatura baja a  $\sim 20\text{--}25^\circ\text{C}$ , acercándose al intervalo recomendable, pero apenas toca el límite inferior del rango de confort en contadas ocasiones. En general, Galpón 1 evidencia problemas de sobrecalentamiento diurno, lo cual en un clima cálido como Villanueva Casanare indica insuficiente enfriamiento ya que en general las temperaturas medidas exceden ampliamente lo recomendado en horas diurnas.

**Figura 24**

*Humedad Promedio Registrada en el Galpón 1*



*Nota.* Promedio de humedad registrada en los meses bajo medición.

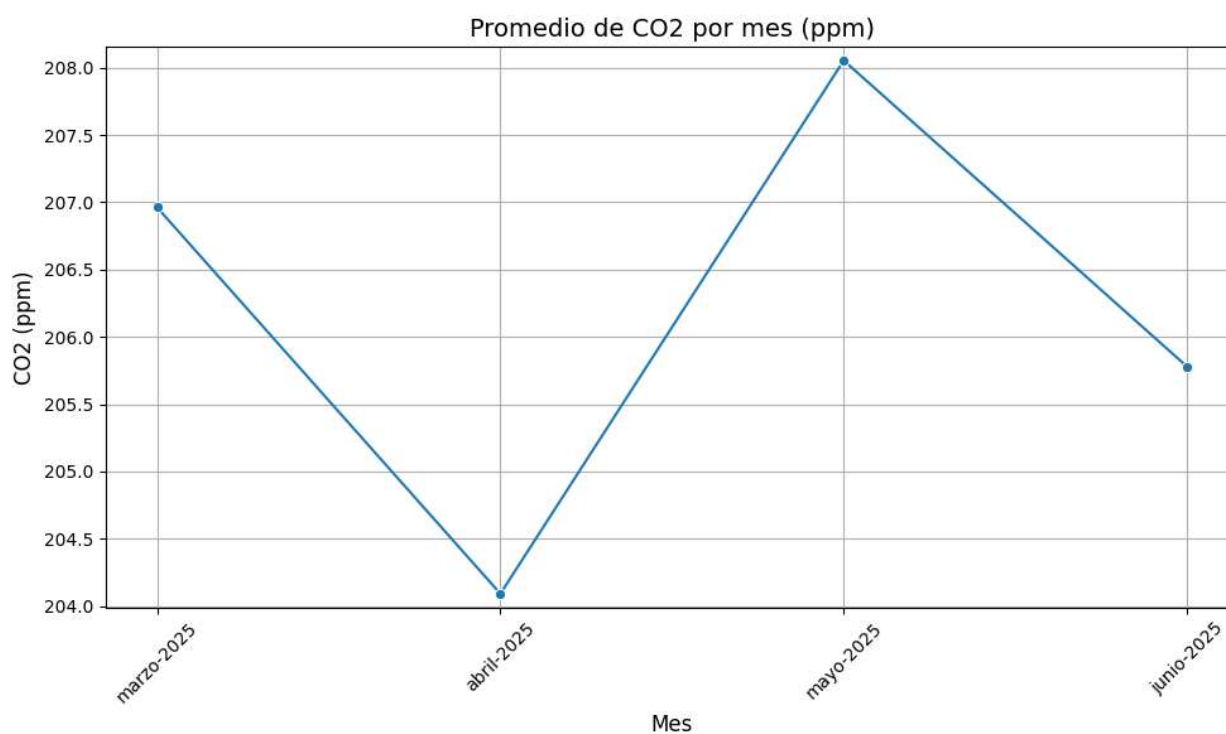
En cuanto a la humedad relativa en el galpón 1 en la figura anterior se puede ver que está muy elevada la mayor parte del tiempo, con valores típicos entre 70–90% durante las noches/madrugadas, Durante algunas horas del mediodía, la humedad baja hasta mínimos de ~45–50% (días más secos o con mayor ventilación), también se puede identificar que la humedad relativa registra algunos valores óptimos entre el 50% y 70% en varios de los días que se toma la medición, es de resaltar que la humedad tan alta indica ventilación insuficiente para remover el aire húmedo generado por la respiración de las aves y la evaporación del material particulada de la cama de las aves. Esta condición favorece condensación y apelmazamiento de la cama, aumentando el riesgo de enfermedades, pododermatitis y niveles altos de amoníaco. Por otro

lado, en contados momentos al mediodía la humedad cae cerca o por debajo del 50%, lo cual puede generar un ambiente demasiado seco y polvoriento.

En síntesis, el galpón 1 requiere mejorar el equilibrio entre temperatura y ventilación para evitar tanta humedad acumulada en las noches, una ventilación mínima constante podría mantener la humedad relativa en un valor adecuado.

### Figura 25

*CO2 Promedio Registrado en el Galpón 1*



*Nota.* Promedio de dióxido de carbono registrada en los meses bajo medición

De acuerdo con el gráfico el periodo comprendido entre marzo y junio de 2025, las concentraciones promedio mensuales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el galpón analizado se mantuviesen dentro de un rango estrecho, oscilando entre aproximadamente 204,0 y 208,0 ppm. Estos valores se encuentran considerablemente por debajo de los límites críticos establecidos

para la avicultura comercial, lo que indica un ambiente con adecuada renovación de aire y un control eficiente de la ventilación. La baja magnitud del CO<sub>2</sub> respalda que, desde la perspectiva respiratoria, las aves disponen de un suministro suficiente de oxígeno y no enfrentan restricciones derivadas de acumulación de gases.

Ahora respecto a la medición diaria de esta variable en el galpón 1 se puede mencionar que de acuerdo a la gráfica los promedios mensuales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el galpón de pollos de engorde, con referencia normativa y de bienestar al estándar Cobb 500. Los valores observados para marzo, abril, mayo y junio se sitúan en el rango de aproximadamente 202–210 partes por millón (ppm). Esta magnitud es marcadamente inferior a los umbrales operativos comúnmente aceptados en avicultura intensiva, donde se busca mantenerse idealmente por debajo de 2 000–3 000 ppm y activar acciones correctivas preventivas antes de aproximarse a 3 000 ppm. En términos de riesgo respiratorio y desempeño productivo, una concentración media mensual cercana a 200 ppm describe un ambiente con ventilación eficaz y con un margen holgado de seguridad respecto de efectos deletéreos sobre las aves y el personal.

La lectura estricta de estos promedios sugiere que la ventilación basal, el recambio de aire y la estanqueidad del galpón están en equilibrio favorable. Un nivel alrededor de 200 ppm se aproxima al fondo ambiental exterior en zonas rurales y, por lo tanto, implica que el CO<sub>2</sub> generado por la respiración de las aves y, cuando se aplica, por combustión de calefactores, está siendo evacuado con suficiencia. Sin embargo, el carácter mensual de la agregación estadística obliga a matizar la conclusión: el promedio puede ocultar picos transitorios relevantes en horarios de mínima ventilación o durante episodios de alta densidad térmica. Desde la perspectiva de bienestar, el parámetro verdaderamente crítico es el tiempo acumulado por encima de umbrales operativos (por ejemplo, 1.000 y 2.000 ppm) más que el promedio en sí mismo; por

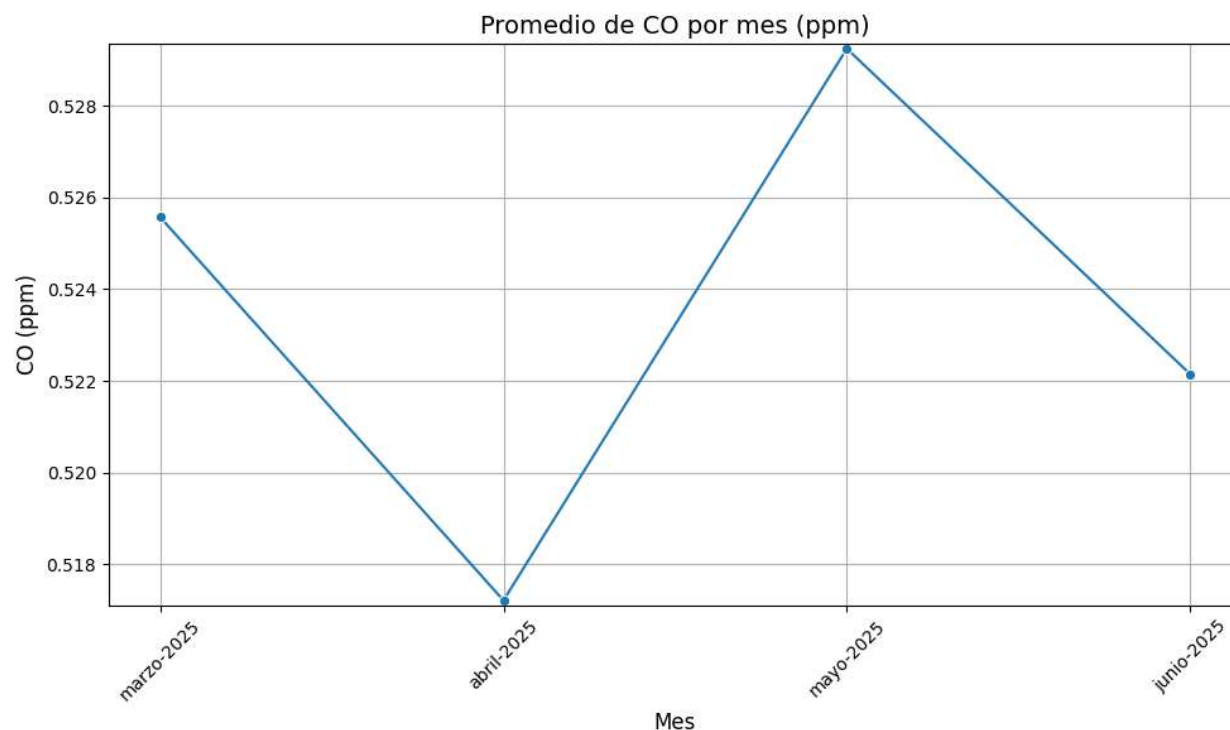
ello, la confirmación con percentiles altos (P90–P95) y el “tiempo en rango” aporta un diagnóstico más sensible a eventos subclínicos.

La ligera tendencia ascendente que culmina en junio, aunque modesta en términos absolutos (un incremento del orden de 4% frente a marzo), es coherente con escenarios de mayor carga animal, ajustes de ventilación para controlar temperatura, o un aumento estacional de la demanda térmica que reduce la apertura efectiva del sistema. En galpones que utilizan calefacción por combustión durante el arranque, la contribución de CO<sub>2</sub> y vapor de agua es doble: elevan la concentración de gas y aumentan la humedad relativa, predisponiendo a problemas posteriores de cama húmeda y proliferación de amoníaco. Aun con promedios bajos, una fracción de horas nocturnas con ventilación mínima puede concentrar episodios de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> que no se reflejan en la media mensual y sí impactan el confort respiratorio y la inflamación de mucosas.

Desde el punto de vista productivo, CO<sub>2</sub> sirve como indicador indirecto de la calidad del manejo de ventilación más que como causa aislada de pérdidas cuando se mantiene bajo 1 000–2 000 ppm. La experiencia de campo muestra que lotes con CO<sub>2</sub> consistentemente bajo tienden a exhibir mejores condiciones de cama, menos dermatitis plantar y menor incidencia de aerosaculitis, en buena medida porque el mismo régimen de ventilación que controla CO<sub>2</sub> controla humedad y NH<sub>3</sub>. En tu caso, los promedios que se reportan se evidencia una fortaleza del sistema; la pregunta operativa ya no es “si hay un problema de CO<sub>2</sub>”, sino “cómo blindar este desempeño frente a variabilidad diaria, cambios de densidad y eventos climáticos”.

**Figura 26**

*CO Promedio Registrado en el Galpón 1*

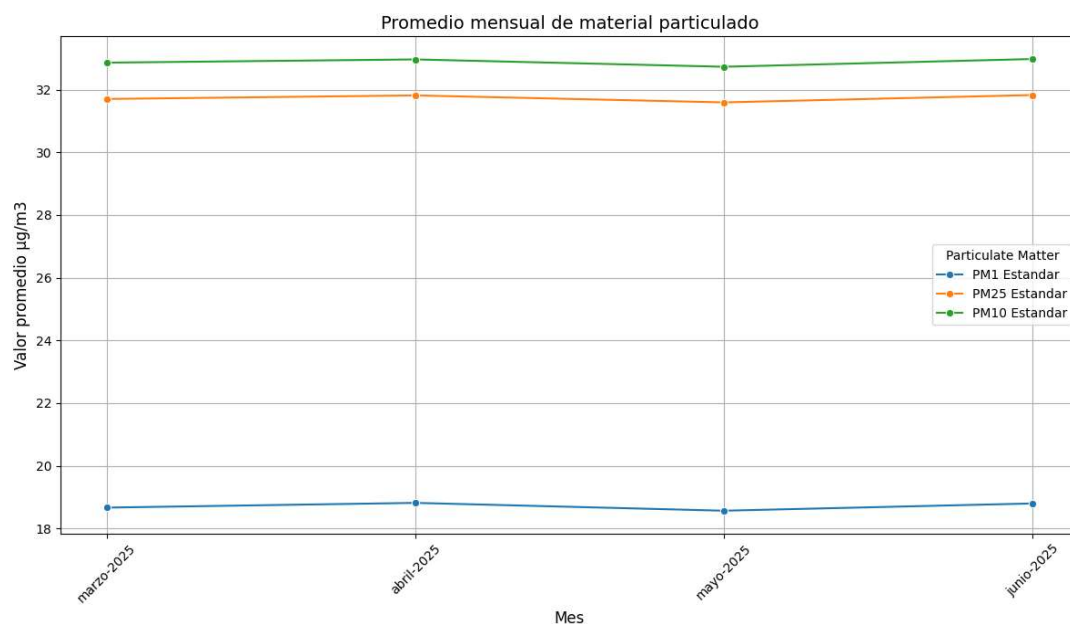


*Nota.* Promedio de monóxido de carbono registrada en los meses bajo medición

Respecto a las mediciones que se registran de CO en este galpón 1 según la gráfica, los promedios mensuales registrados entre marzo y junio de 2025 se mantienen en un rango estrecho, entre 0,518 y 0,527 ppm. Este nivel es considerablemente inferior a cualquier umbral de riesgo para las aves o el personal, lo que refleja un ambiente seguro y libre de acumulaciones peligrosas de este gas. La estabilidad observada evidencia un sistema de ventilación efectivo y un control adecuado de las fuentes de combustión, garantizando que el CO no represente un factor limitante para el bienestar o el rendimiento productivo.

En términos de comportamiento temporal, se detecta una ligera disminución de marzo a abril, probablemente asociada a ajustes en la ventilación, menor uso de calefactores o cambios en la densidad poblacional de aves. Posteriormente, en mayo, se observa un leve incremento, que podría relacionarse con un aumento en el uso de sistemas de calefacción o variaciones en las condiciones climáticas externas. Finalmente, en junio, la concentración vuelve a descender, recuperando niveles similares a los del inicio del periodo. Esta oscilación mínima, de apenas 0,009 ppm entre el valor más alto y el más bajo, indica que las variaciones no son acumulativas y que el sistema recupera rápidamente su estabilidad.

De acuerdo con las recomendaciones del manual Cobb 500, aunque el CO no es un contaminante prioritario en el manejo de galpones avícolas, su monitoreo es relevante como indicador indirecto de la eficiencia en la combustión y la ventilación. Mantenerlo en niveles prácticamente nulos contribuye a evitar estrés fisiológico en las aves y garantiza un entorno óptimo para su metabolismo. En este sentido, los resultados del Galpón 1 respaldan que las condiciones de manejo y control ambiental son apropiadas, constituyendo un ejemplo de operación estable y segura.

**Figura 27***Material Particulado Promedio Registrado en el Galpón 1*

*Nota.* Promedio de material particulado registrada en los meses bajo medición

Otra variable que se midió en este galpón fue el material particulado, frente a esto se encontró lo siguiente:

Cuenta con mediciones de material particulado en tres fracciones: PM10, PM2.5 y PM1 (partículas con diámetro  $<10\mu\text{m}$ ,  $<2.5\mu\text{m}$  y  $<1\mu\text{m}$  respectivamente). En general, los niveles de polvo que se observan son moderados, con valores típicos de 20–60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para PM10 durante buena parte del periodo.

Se aprecia un pico inicial elevado al comienzo del 15 de marzo (PM10  $\sim 205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM2.5  $\sim 56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) posiblemente debido a movimiento de cama o ingreso de pollitos (levantando

polvo). Tras ese evento, las concentraciones bajan; la mayor parte del tiempo PM10 oscila entre ~20 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras PM2.5 está generalmente por debajo de 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos valores están muy por debajo del límite permisible de 4  $\text{mg}/\text{m}^3$  (4000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) establecido para polvo respirable. Esto indica que no se alcanzan niveles peligrosos de polvo para la salud. No obstante, incluso concentraciones moderadas de polvo pueden afectar las vías respiratorias de las aves, la mayor parte del polvo es de fracción gruesa el cual fue detectado por el sensor PM10, posiblemente por el movimiento en la cama; la fracción fina detectada por el sensor PM2.5 es mucho menor, esto deja ver poco riesgo respiratorio para las aves. Aun así, sería beneficioso minimizar la generación de polvo mediante un buen manejo de la cama evitando que se seque en exceso, ya que el polvo orgánico puede transportar patógenos y perjudicar la salud respiratoria de aves especialmente el polvo fino que penetra más profundamente.

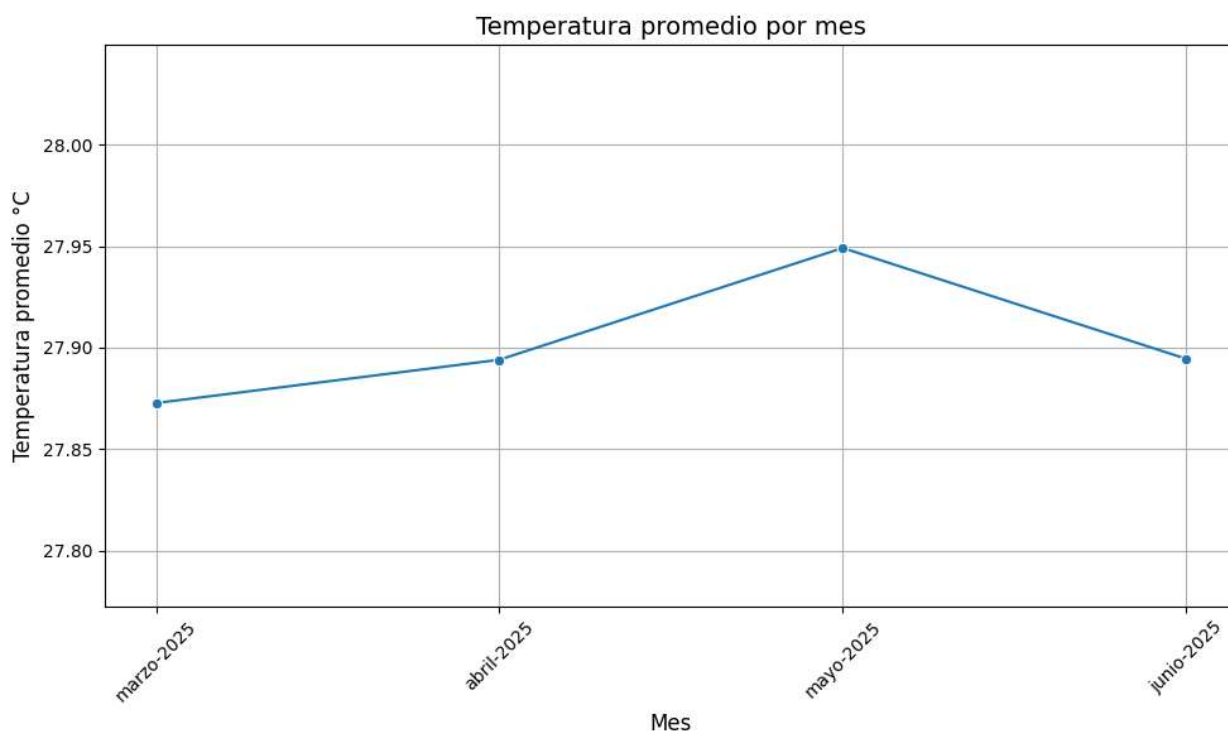
### **Análisis de Variables Ambientales Capturadas en el Galpón 2**

Para el galpón 2 luego de finalizar el proceso de medición y captura de variables se puede mencionar lo siguiente:

En la figura 28 se observa el comportamiento de la temperatura promedio por mes del galpón 2 de acuerdo con los datos capturados

**Figura 28**

*Temperatura Promedio Mensual Registrado en el Galpón 2*



*Nota* Promedio de temperatura registrada en los meses bajo medición.

De acuerdo con el gráfico anterior el galpón muestra una termodinámica estable, pero con un sesgo cálido sostenido. La variación es mínima, lo que habla de control consistente; sin embargo, estar cerca de 28°C durante meses sugiere que la línea base de calor es alta y cualquier pico horario o aumento de humedad puede empujar a las aves fuera de su zona de confort.

Operativamente, mayo marca el punto más alto y merece auditoría de ventilación: transición oportuna a túnel, estanqueidad del galpón, y, sobre todo, velocidad real de aire a nivel de las aves. En calor, la meta es asegurar flujo efectivo que disipe calor sensible y latente; velocidades de 2–3 m/s durante las horas críticas ayudan a mitigar el estrés, mientras que en

pollitos deben evitarse corrientes directas y velocidades altas. Revisar también el gradiente longitudinal: diferencias mayores a 2°C entre extremos suelen indicar desbalance de extracción o infiltraciones.

Para afinar bienestar y desempeño te recomiendo monitoreo horario y análisis de percentiles: cuántas horas al mes está por encima de 29–30°C y con humedad >70%. Con esos datos, se construye un índice de estrés calórico que combine temperatura y humedad y permita decidir cuándo activar enfriamiento evaporativo (pads, nebulización o aspersión de baja presión) sin saturar el ambiente; ya que, con humedades altas, la eficiencia del enfriamiento evaporativo cae, así que el control debe ser por etapas y con objetivos claros de humedad.

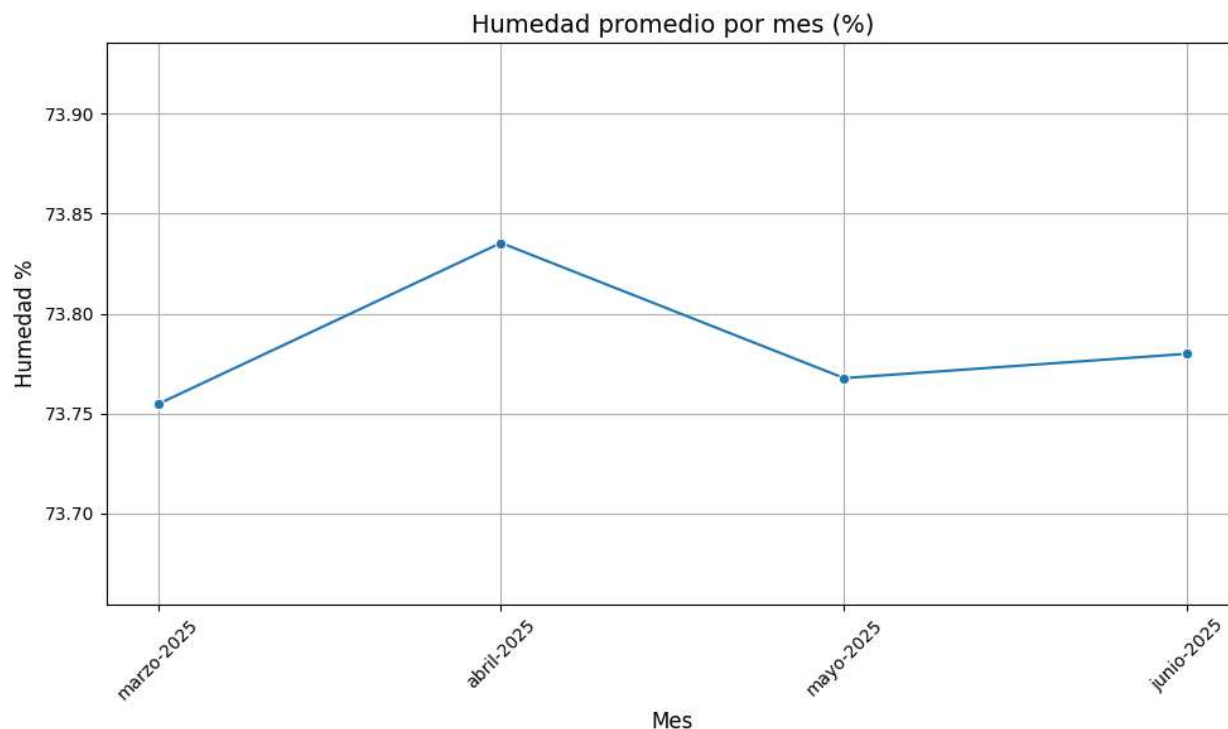
Adicional a esto se puede mencionar que el comportamiento es similar en patrón diario al Galpón 1, aunque con ligeras diferencias cuantitativas., la temperatura oscila con mínimas ~20–21°C en la madrugada y alcanza máximas de ≈36.1°C en los días más cálidos. Al igual que en el galpón 1, prácticamente todas las jornadas las temperaturas superan los 30°C durante varias horas, excediendo el rango de confort (>24°C) para pollos de engorde de 4 semanas de nacidos.

Sin embargo, el galpón 2 muestra quizás picos ligeramente menores o de menor duración que Galpón 1 (la máxima fue 36.1°C vs 36.6°C).

Aun así, la diferencia es marginal: las aves en el galpón 2 también están sometidas a estrés calórico diario en horas pico. En las noches, la temperatura baja a ~25°C como mínimo, manteniéndose por encima de 21–23°C recomendado. En resumen, en el galpón 2 también sufre de sobrecalentamiento diurno, indicando que carece de suficiente enfriamiento/ventilación para limitar la temperatura interna.

**Figura 29**

*Humedad Relativa Promedio Mensual Registrado en el Galpón 2*



*Nota.* Promedio de humedad registrada en los meses bajo medición

De acuerdo a este gráfico de humedad promedio mensual (marzo–junio 2025) a la luz de las guías de manejo de Cobb para pollos de engorde, la lectura dominante es un ambiente crónicamente húmedo: los promedios se mantienen alrededor de 73.8% con variación mínima. En crecimiento y engorde, Cobb recomienda trabajar típicamente en bandas de 50–70% de humedad relativa para favorecer la respiración, el secado de la cama y el confort; sostenerse por encima de 70% durante semanas reduce la capacidad de disipar calor por evaporación y predispone a problemas de cama, aun si la temperatura media mensual no luce extrema.

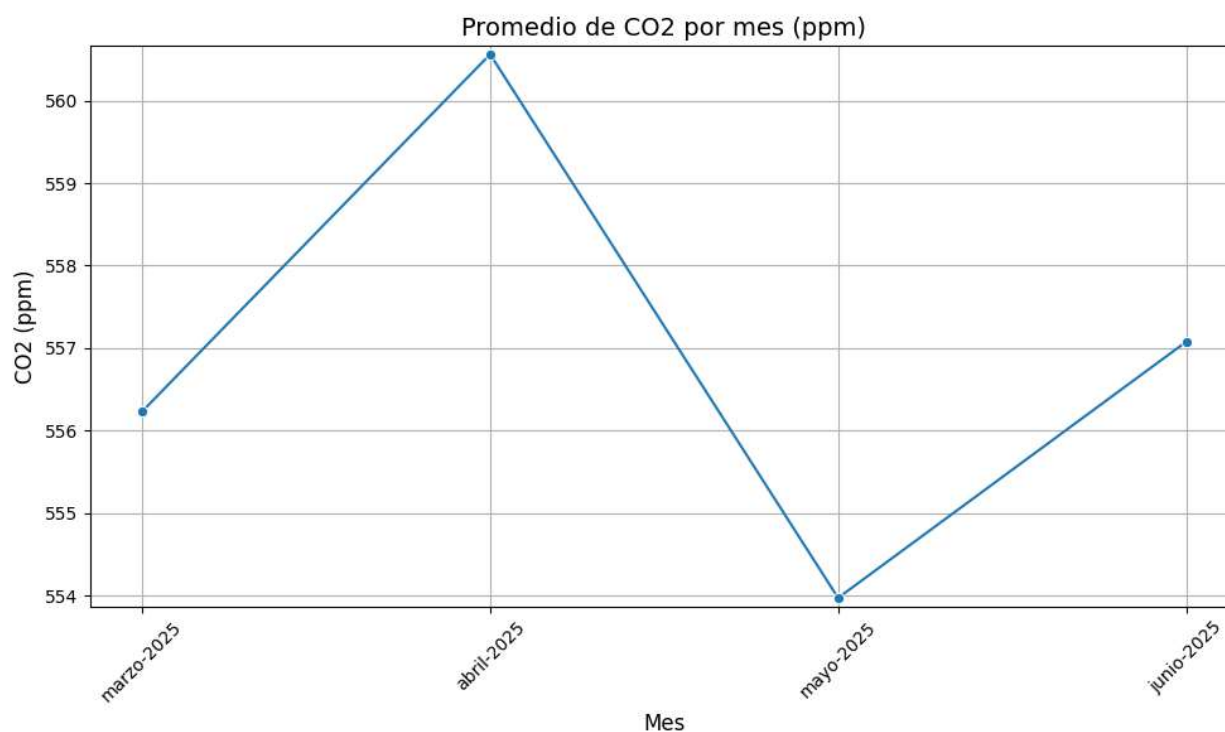
En relación con la humedad relativa este galpón registra valores muy altos durante gran parte del tiempo, de forma parecida a Galpón 1. En las noches alcanzan 90–95% de humedad y durante pocas horas del día baja a mínimos alrededor de 49% (ligeramente por encima del mínimo del galpón 1).

En general el galpón 2 mantiene la humedad entre 70% y 90% casi constantemente fuera de algunos picos secos al mediodía. Esto implica, nuevamente, ventilación insuficiente o ingreso de aire muy húmedo de afuera, típico en Casanare durante época de lluvias.

Aunque el galpón 2 tiene un mínimo de humedad un poco mayor (no bajó de 49%, vs 45% en el galpón 1), la diferencia es menor: ambos galpones estuvieron mayormente fuera del rango 50–70%. Por ende, en el galpón 2 también existe riesgo de cama húmeda y acumulación de amoníaco por la humedad elevada.

**Figura 30**

*Nivel de CO2 Promedio Registrado en el Galpón 2*



*Nota.* Promedio de dióxido de carbono registrado en los meses bajo medición.

En el periodo comprendido entre marzo y junio de 2025, las concentraciones promedio mensuales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se registran en el galpón de engorde se mantienen dentro de un rango estrecho, oscilando entre 554,9 ppm y 561,2 ppm. Esta estabilidad sugiere un control ambiental constante, sin fluctuaciones abruptas que pudieran comprometer las condiciones de bienestar de las aves. Cabe resaltar que los valores observados se sitúan muy por debajo de los límites máximos establecidos por el manual Cobb 500, que recomienda mantener niveles inferiores a 3 000 ppm y, de ser posible, próximos a 2 500 ppm para garantizar un entorno óptimo de producción. La magnitud registrada no solo cumple, sino que supera ampliamente

dichos estándares, lo que evidencia una ventilación eficaz y un adecuado equilibrio entre recambio de aire y conservación de temperatura.

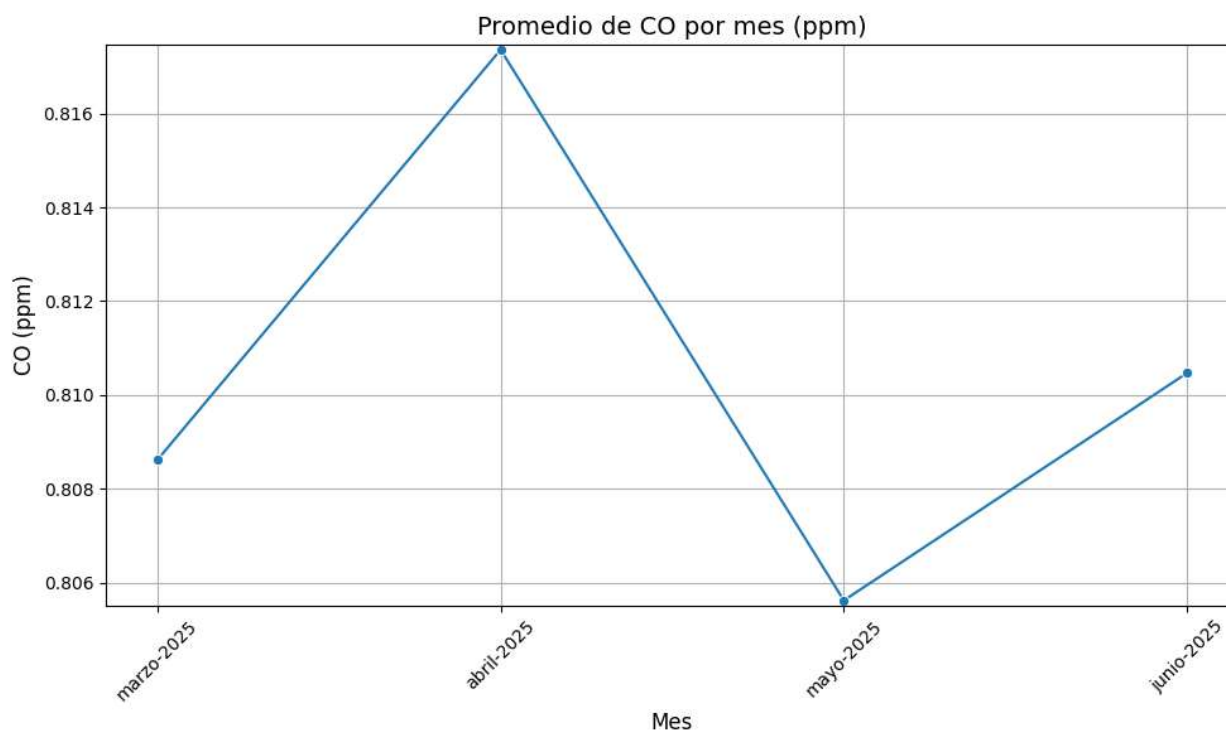
Tomando como referencia las mediciones diarias de CO<sub>2</sub> que se registran en el galpón 2, el análisis revela patrones propios de un sistema de ventilación que responde de manera adecuada a las condiciones climáticas de la región, pero con ciertas particularidades que vale la pena señalar. Villanueva se caracteriza por un clima cálido, con temperaturas externas elevadas durante gran parte del día y noches menos frías que en zonas de altura como Bogotá; esto influye directamente en la dinámica interna del CO<sub>2</sub>, ya que los recambios de aire no están condicionados por la necesidad de conservar calor, sino por la gestión simultánea de temperatura y humedad.

En la mayoría de las jornadas, las concentraciones de CO<sub>2</sub> muestran niveles bajos y relativamente estables, con incrementos moderados hacia la madrugada, coincidiendo con las horas de menor actividad de ventilación mecánica. Estos picos, aunque presentes, rara vez se aproximan a los límites máximos establecidos por el manual Cobb 500 (3 000 ppm) y, en su mayoría, permanecen ampliamente por debajo de los 2 500 ppm recomendados como óptimos. Esto sugiere que la ventilación mínima está calibrada para evacuar de manera efectiva el gas producido por las aves, incluso en horas de menor demanda térmica.

Sin embargo, se detecta que, en determinados días, coincidiendo con humedades relativas elevadas y ausencia de viento exterior, la concentración de CO<sub>2</sub> presenta acumulaciones más prolongadas durante la noche. Aunque estas no alcanzan niveles críticos, sí podrían representar un margen de mejora ajustando los recambios nocturnos para evitar la combinación de alta humedad y gases acumulados, ya que esta interacción puede incrementar el estrés fisiológico de las aves y predisponer a problemas respiratorios subclínicos.

**Figura 31**

*Nivel de CO Promedio Registrado en el Galpón*



*Nota.* Promedio de monóxido de carbono registrado en los meses bajo medición.

Ahora hablando del monóxido de carbono medido en el galpón se puede decirlo siguiente de acuerdo con el gráfico de promedio mensual durante el periodo comprendido entre marzo y junio de 2025, los niveles promedio mensuales de monóxido de carbono (CO) en el galpón se mantienen en un rango estrecho, con valores que oscilaron entre 0,807 y 0,816 ppm. El mes de abril registró el valor más alto (0,816 ppm), seguido de un descenso en mayo (0,807 ppm) y un ligero incremento en junio (0,810 ppm). Esta estabilidad evidencia un control adecuado de las condiciones ambientales, sin fluctuaciones significativas que pudieran comprometer el bienestar de las aves.

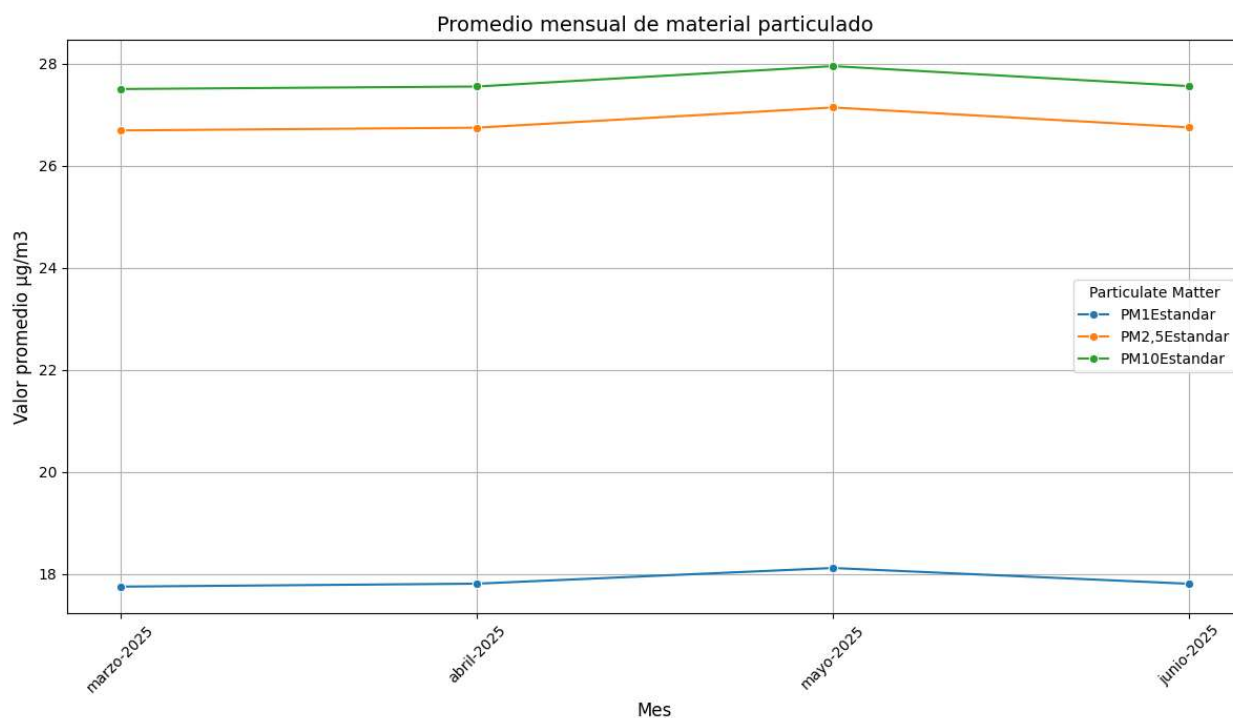
Si bien el manual técnico Cobb 500 para pollos de engorde no establece límites específicos para la concentración de CO, la bibliografía especializada en producción avícola señala que concentraciones inferiores a 10 ppm no representan riesgo para la salud de las aves ni para el personal operativo. En este contexto, los valores registrados se ubican ampliamente por debajo de dicho umbral, lo que sugiere la presencia de un sistema de ventilación eficiente y un correcto funcionamiento de los equipos de combustión utilizados para calefacción.

En un análisis diario se puede mencionar que las concentraciones de CO se mantienen muy bajas, típicamente  $< 3-4$  ppm máximos. Esto sugiere que en el galpón 2 la combustión de calentadores es más limpia o se usan menos calefactores de combustión o la ventilación extrae eficazmente los gases. En todo caso el galpón 2 mantiene  $CO < 20$  ppm en todo momento, cumpliendo con las recomendaciones de seguridad.

Finalmente, para este galpón en las mediciones de material particulado arrojaron lo siguiente, empezando por lo que se muestra en la figura 32

**Figura 32**

*Nivel de Material Particulado Promedio Registrado en el Galpón 2*



*Nota.* Promedio de material particulado en los meses bajo medición.

Teniendo en cuenta la gráfica anterior los promedios mensuales se mantienen prácticamente planos:  $PM1 \approx 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM2,5 \approx 27 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $PM10 \approx 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La relación jerárquica esperada se cumple ( $PM1 \leq PM2,5 \leq PM10$ ) y el “gap” entre  $PM2,5$  y  $PM10$  es muy pequeño ( $\sim 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), lo que sugiere una fracción gruesa ( $10\text{--}2,5 \mu\text{m}$ ) casi inexistente en el promedio mensual. Esto encaja con meses lluviosos y con buena ventilación mínima, pero también puede indicar que el sensor o su ubicación no están capturando bien el polvo más grueso (sedimentable) típico de manejo de cama, actividad de aves y tránsito interno.

El manual Cobb 500 no fija umbrales numéricos específicos para PM1/PM2,5/PM10; su enfoque es mantener aire “limpio” y respirable, con ventilación mínima suficiente, humedad relativa controlada y cama seca para limitar polvo y agentes irritantes. Leído bajo ese criterio:

- 1) Los niveles que reportan respaldan un ambiente que, en promedio, no impone una carga de polvo que comprometa la respiración o bienestar. Esto es coherente con ventilación funcional y manejo de cama razonable
- 2) La mayor proporción de partículas finas (PM1 y PM2,5 muy cercanas al total PM10) indica que, cuando hay polvo, este es principalmente respirable. Aun con valores bajos, esa fracción fina es la que más impacta tracto respiratorio; por tanto, sigue siendo clave sostener ventilación mínima nocturna y humedad en rango objetivo para evitar acumulaciones puntuales.
- 3) El manual Cobb pone fuerte énfasis en controlar gases (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>) y polvo de forma integrada, estos resultados invitan a priorizar seguimiento horario y por eventos (cama, alimentación, captura) para confirmar que los promedios no esconden picos breves que sí estrenarán a las aves.

Las tres fracciones PM1, PM2,5 y PM10 bajo criterios operativos del manejo Cobb 500: aire limpio, ventilación mínima suficiente, cama en buen estado y control integrado con gases, el panorama apunta a un ambiente estable y con baja carga de polvo, típico de la transición a lluvias en Casanare.

PM1 representa partículas finas de mayor penetración pulmonar; una línea base cercana a 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  indica un trasfondo “respirable” bajo y estable, compatible con ventilación mínima constante y cama no polvorienta. PM2,5 alrededor de 27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sugiere que, cuando hay polvo, predomina la fracción fina más que episodios de polvo grueso levantado por manejo intenso.

PM10 apenas por encima de PM2,5 (brecha  $\sim 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) indica escasa presencia de fracción 10–2,5  $\mu\text{m}$  en los promedios; esto es coherente con época húmeda y con tareas de cama sin turbulencia excesiva, pero también puede reflejar que el sensor está lejos de la zona de mayor actividad o con flujo de aire que deposita partículas gruesas antes del muestreo.

Durante el periodo evaluado en el galpón 1, las condiciones ambientales que se registran a través de las mediciones diarias de temperatura, humedad relativa, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y material particulado (PM1, PM2,5 y PM10) evidencian un manejo técnico que mantiene, en términos generales, un ambiente seguro y estable para el desarrollo de pollos de engorde. Las concentraciones de CO se mantienen consistentemente muy por debajo de los niveles de referencia considerados de riesgo —menos de 10 ppm—, lo que indica una combustión eficiente en los equipos de calefacción y una ventilación adecuada para evacuar gases derivados de dicho proceso. No se detectaron acumulaciones peligrosas, y la mínima variación entre jornadas refleja un control sostenido de esta variable, incluso en condiciones que podrían demandar mayor uso de calefactores.

En cuanto al CO<sub>2</sub>, las concentraciones diarias se ubicaron muy por debajo del umbral máximo de 3 000 ppm recomendado por el manual Cobb 500 y, en muchos casos, incluso por debajo del valor óptimo de 2 500 ppm. Este comportamiento indica que el sistema de ventilación garantiza una renovación suficiente del aire, evitando hipoxia y favoreciendo una adecuada oxigenación de las aves. La estabilidad de estos valores sugiere un correcto dimensionamiento de la ventilación mínima, capaz de prevenir acumulaciones nocturnas y distribuir de forma homogénea el flujo de aire a la altura de las aves, condición indispensable para minimizar el estrés fisiológico y optimizar el consumo de alimento.

El comportamiento de la temperatura y la humedad relativa complementa este escenario favorable. La temperatura se mantiene, en términos generales, en rangos compatibles con las exigencias térmicas por edad según las guías técnicas, evitando tanto enfriamientos prolongados como episodios de sobrecalentamiento. La humedad relativa se mantiene mayormente dentro de valores adecuados (50 %–70 %), lo que ayuda a conservar una cama en condiciones óptimas y limita la proliferación de microorganismos patógenos. En momentos puntuales, pequeñas desviaciones en la humedad podrían requerir ajustes de ventilación para prevenir la aparición de polvo excesivo o, en sentido contrario, la generación de condiciones propicias para el incremento de amoníaco.

El registro de material particulado muestra niveles bajos y estables para PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>, lo que sugiere que las prácticas operativas han sido efectivas para minimizar la liberación de polvo. La escasa diferencia entre PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> indica que la fracción predominante corresponde a partículas finas, las más críticas desde el punto de vista respiratorio, aunque sus valores absolutos están lejos de representar un riesgo significativo. Esto refleja una gestión de cama eficiente, control en la manipulación del alimento y ausencia de episodios intensos de liberación de polvo sin la debida extracción de aire.

En conjunto, las variables medidas permiten concluir que el galpón 1 mantiene un microclima controlado y alineado con los parámetros de bienestar animal definidos por el manual *Cobb 500*. La interacción equilibrada entre ventilación, manejo térmico, control de humedad y minimización de contaminantes gaseosos y particulados contribuye a un ambiente respirable, seguro y productivo. No obstante, se recomienda mantener la vigilancia continua de las variables clave, reforzar la ventilación mínima en noches con humedad elevada y programar las actividades que generan polvo en horarios con ventilación reforzada. Este enfoque preventivo

garantizará la estabilidad ambiental observada, asegurando que el galpón continúe ofreciendo condiciones óptimas para el desarrollo eficiente de las aves.

En el análisis integral del galpón 2, considerando las mediciones de temperatura, humedad relativa, concentraciones de CO, CO<sub>2</sub> y niveles de material particulado (PM1, PM2,5 y PM10), se evidencia que la interacción dinámica entre estas variables condiciona directamente el confort, la salud y el rendimiento productivo de las aves. La temperatura, en su mayoría, se mantiene en rangos operativos aceptables según las directrices del manual *Cobb 500*, aunque con fluctuaciones que en ciertos momentos tienden a acercarse al límite superior. Este comportamiento, cuando coincide con incrementos de humedad relativa, genera un ambiente más propenso al estrés térmico, reduciendo el consumo de alimento y, en consecuencia, la ganancia de peso. En tales escenarios, una estrategia de ventilación cuidadosamente ajustada — incrementando el caudal de aire sin provocar corrientes directas sobre aves jóvenes— no solo ayuda a evacuar calor acumulado, sino que también contribuye a arrastrar partículas suspendidas y renovar la atmósfera interior.

La humedad relativa, que en condiciones óptimas debería oscilar entre el 50 % y el 70 %, mostró episodios de elevación durante la madrugada. Este patrón, asociado a la reducción del flujo de aire en horas de menor actividad, favorece la condensación sobre superficies frías, incrementando el riesgo de proliferación microbiana en la cama y las paredes. Un reforzamiento puntual de la ventilación mínima en ese intervalo permitiría controlar la humedad sin alterar el equilibrio térmico. A la inversa, humedades muy bajas —detectadas en algunos tramos— incrementan la fragilidad de la cama, aumentando la generación de polvo fino y, por ende, los niveles de PM1 y PM2,5, que son las fracciones más respirables y potencialmente irritantes.

En cuanto a los gases, la presencia de CO, aunque generalmente baja, requiere vigilancia continua. Valores por encima de 10 ppm implican revisar de inmediato los sistemas de combustión, particularmente calefactores o equipos a gas, para prevenir intoxicaciones y lesiones respiratorias. El CO<sub>2</sub>, marcador confiable de ventilación insuficiente y densidad de aves, se mantiene mayormente bajo control, aunque en picos de actividad o en momentos de elevada densidad se registraron ascensos que conviene atajar reforzando la renovación de aire. Es importante destacar que la combinación de CO<sub>2</sub> elevado con altas concentraciones de PM aumenta el riesgo de estrés respiratorio, incluso si cada variable por separado se encuentra dentro de rangos admisibles.

El material particulado, tanto en su fracción gruesa (PM<sub>10</sub>) como fina (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>1</sub>), mostró niveles influenciados por las operaciones internas más que por condiciones externas. Actividades como el volteo de cama en seco, la redistribución de alimento o el desplazamiento masivo de aves elevan la concentración de partículas de forma inmediata. Para mitigar este efecto, resulta pertinente programar dichas tareas en horarios con ventilación reforzada y evitar su ejecución en periodos de reposo. Adicionalmente, la revisión de la granulometría del alimento y la aplicación de tratamientos superficiales con aceite vegetal pueden disminuir la liberación de polvo desde los comederos, mejorando el ambiente respirable.

Integrar estas observaciones en un manejo operativo coherente implica adoptar un enfoque dinámico en el que la regulación de la ventilación responda no solo a una variable aislada, sino a la interacción simultánea de temperatura, humedad, gases y partículas. Así, un incremento térmico diurno que coincide con humedad elevada debe motivar ajustes que también favorezcan la reducción de CO<sub>2</sub> y arrastre de PM. En cambio, cuando la humedad cae por debajo de los niveles óptimos, es necesario moderar el flujo para preservar la estructura de la cama. Este

tipo de control cruzado y continuo, apoyado en mediciones confiables y calibradas a la altura de las aves, asegura un entorno ambientalmente estable y seguro, optimizando tanto el bienestar animal como la eficiencia productiva del galpón 2.

### **Recomendaciones para los Galpones Posterior a la implementación de los Dispositivos IoT**

La evaluación del sistema en la finca piloto de Villanueva, Casanare, reveló desafíos directamente ligados a las condiciones climáticas del territorio. Los análisis de los galpones 1 y 2 mostraron que, si bien el CO<sub>2</sub> se mantiene en niveles seguros, la humedad relativa fue la variable más crítica, alcanzando picos superiores al 90%. Esta condición es característica de la alta humedad ambiental de la región, especialmente en épocas de lluvia, y representa una necesidad particular que la solución debe abordar.

Mientras la temperatura diurna excede el rango de confort, causando riesgo de estrés calórico, la alta humedad nocturna agrava el problema al dificultar la termorregulación de las aves y favorecer la proliferación de patógenos en la cama. Por lo tanto, una implicación práctica directa para el territorio es que cualquier solución de Smart Farming en Casanare debe priorizar la gestión integrada de la ventilación y la humedad, no solo la temperatura. Las recomendaciones generadas se adaptaron a esta realidad, sugiriendo reforzar la ventilación mínima en noches húmedas, incluso a costa de una ligera pérdida de calor."

Para empezar este apartado en la tabla 4 se muestra un resumen de las recomendaciones para los galpones puestos a prueba luego de la captura de las variables ambientales.

**Tabla 4**

## Recomendaciones Generales para los dos Galpones

Variable	Umbral de Alerta (según COBB y condiciones Casanare)	Tipo de Alerta	Recomendación ante alerta
Temperatura	< 28 °C (inicio de engorde) o > 32 °C (etapa media/fin)	Crítica	Revisar ventilación, activar enfriamiento evaporativo o cortinas.
	Fluctuaciones > 2 °C en 1 hora	Preventiva	Verificar corrientes de aire y apertura de compuertas.
Humedad Relativa	< 50 % o > 75 %	Crítica	Regular nebulizadores o ventilación.
	Tendencia creciente por 3 horas consecutivas	Tendencia	Evaluar acumulación de excretas o poca ventilación.
CO <sub>2</sub> (ppm)	> 2500 ppm	Crítica	Encender extracción forzada o abrir compuertas.
	> 1800 ppm durante más de 1 hora	Preventiva	Optimizar flujo de aire.
CO (ppm)	> 50 ppm	Crítica	Posible falla en combustión. Revisar calefactores o equipos a gas.
	> 25 ppm durante más de 30 min	Preventiva	Revisar equipos de calefacción.
PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	> 75 µg/m <sup>3</sup>	Crítica	Aumentar ventilación, humedecer ambiente.

Variable	Umbral de Alerta (según COBB y condiciones Casanare)	Tipo de Alerta	Recomendación ante alerta
	> 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante más de 1 hora	Preventiva	Limpia exceso de polvo en cama.
PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	> 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Crítica	Revisar calidad de la cama, reducir el polvo.
	Aumento progresivo por más de 3 horas	Tendencia	Evaluar tipo de cama o movimiento del personal.
Tendencias	Aumento sostenido de temperatura + CO <sub>2</sub> + PM en conjunto	Multivariab le	Riesgo de estrés térmico o falla en ventilación, emitir alerta múltiple.

*Nota.* Recomendaciones generales para mejorar los valores de variables ambientales en los galpones.

Considerando el comportamiento ambiental y productivo de ambos galpones durante el periodo evaluado, se recomienda mantener un enfoque preventivo y diferenciado que potencie las fortalezas identificadas y atienda las oportunidades de mejora particulares en cada instalación. En términos generales, la ventilación mínima ha demostrado ser suficiente para controlar las concentraciones de CO y CO<sub>2</sub> en rangos seguros, pero se sugiere reforzarla de forma estratégica en jornadas con alta humedad relativa, especialmente en horas nocturnas, para prevenir condensaciones y acumulación de amoníaco en la cama. La calibración periódica de sensores y la verificación de su ubicación seguirán siendo prioritarias para garantizar la validez de los registros y la toma de decisiones fundamentadas.

En materia térmica, ambos galpones han mostrado estabilidad en la mayor parte del ciclo, sin episodios críticos de sobrecalentamiento o enfriamiento. No obstante, se aconseja programar revisiones Inter diarias de los sistemas de calefacción y extracción en días con cambios bruscos de temperatura ambiental, asegurando que las aves dispongan de microclimas homogéneos que minimicen el estrés fisiológico y favorezcan la conversión alimenticia. El uso de cortinas y la distribución uniforme del flujo de aire resultan determinantes para evitar zonas frías o corrientes directas.

El control de material particulado ha sido satisfactorio, con niveles bajos y estables de PM1, PM2,5 y PM10. Aun así, se propone continuar con prácticas de manejo de cama que reduzcan la liberación de polvo, como volteos controlados y humectación ligera en momentos de mayor sequedad ambiental. Para ambas naves, la programación de actividades generadoras de polvo debe coincidir con periodos de mayor renovación de aire.

Al analizar ambos galpones, la humedad relativa se configura como un eje crítico de control, estrechamente interdependiente con la temperatura, el CO<sub>2</sub> y el CO, dado que su variación no solo influye en la salud respiratoria y en la condición de la cama, sino también en la eficiencia de ventilación y calefacción.

En condiciones de temperatura óptima según la edad de las aves, mantener la humedad entre 50 % y 70 % favorece la termorregulación y evita que el aire se vuelva excesivamente seco, lo que podría aumentar la liberación de partículas finas y la irritación de mucosas respiratorias. Por el contrario, si la humedad supera el 70 %, incluso con temperatura dentro de rangos aceptables, el riesgo de condensación sobre superficies frías y de proliferación microbiana se incrementa, afectando tanto el bienestar animal como la integridad estructural de la cama. Esta

saturación del aire limita, además, la capacidad de la ventilación para evacuar CO<sub>2</sub>, ya que la carga de vapor de agua reduce la eficiencia de mezcla y renovación del aire.

La relación con el CO<sub>2</sub> es particularmente sensible en noches frías y húmedas, cuando la ventilación mínima tiende a reducirse para conservar calor. En estos casos, si no se ajusta el flujo de aire, el incremento progresivo de humedad relativa se acompaña de acumulación de CO<sub>2</sub>, pudiendo acercarse a niveles que comprometen la oxigenación. Para prevenirlo, es recomendable establecer un umbral dinámico que active un aumento temporal de la ventilación mínima cuando la humedad supere valores críticos, incluso a costa de una ligera pérdida de calor.

En cuanto al CO, su concentración es baja en ambos galpones, pero la humedad y la temperatura influyen indirectamente en su control. Un ambiente frío y húmedo demanda más uso de calefactores, y si el sistema de combustión no es completamente eficiente, podría elevar los niveles de CO. Por ello, la combinación de monitoreo simultáneo de temperatura, humedad y CO durante los periodos de calefacción intensa permite detectar y corregir de forma temprana posibles desviaciones.

De forma integrada, se recomienda:

- 1) Ajustar la ventilación mínima de forma coordinada con sensores de humedad y CO<sub>2</sub> para prevenir acumulaciones simultáneas.
- 2) Optimizar el aislamiento térmico para reducir la necesidad de calefacción en climas fríos y húmedos, minimizando tanto el consumo energético como el riesgo de generación de CO.
- 3) Programar inspecciones de cama en condiciones de alta humedad relativa para evaluar compactación y amoníaco, y aplicar correcciones rápidas.

4) Implementar curvas de control estacional que contemplen cómo varía la relación entre humedad, temperatura y gases, evitando ajustes aislados por variable.

Esta estrategia permite que la humedad relativa deje de ser un factor pasivo y se convierta en un indicador dinámico para regular, en tiempo real, el balance térmico y la calidad del aire, reforzando así el bienestar animal y la estabilidad productiva en ambos galpones.

Finalmente, se recomienda que las evaluaciones ambientales de ambos galpones se integren en un sistema comparativo de seguimiento que permita identificar patrones y diferencias operativas. Esto facilitará la implementación de mejoras específicas y el diseño de protocolos adaptados a las condiciones microclimáticas de cada instalación. La aplicación constante de estas recomendaciones, en concordancia con las guías del manual *Cobb 500* y la observación directa en campo, permitirá sostener y optimizar las condiciones de bienestar animal y eficiencia productiva en ambos galpones.

Ahora si se compara el prototipo desarrollado con el trabajo de otros investigadores se tiene que si bien existen diversas propuestas para el monitoreo de variables en fincas avícolas, como las desarrolladas por Herrera y Ortiz (2022) y Castillo et al. (2019), este proyecto se diferencia por su enfoque específico en las microempresas rurales. A diferencia de soluciones que podrían requerir una mayor inversión inicial o conocimientos técnicos avanzados, nuestro sistema fue diseñado desde su concepción con componentes de bajo costo (como el microcontrolador ESP8266EX) y una plataforma de visualización web intuitiva para democratizar el acceso a la tecnología Smart Farming.

Mientras que otros trabajos se centran en el control automatizado de variables específicas como temperatura y CO<sub>2</sub>, nuestro enfoque es integral y diagnóstico, monitoreando un conjunto

más amplio de variables (incluyendo material particulado PM1, PM2.5 y PM10) para ofrecer un panorama completo de la calidad del ambiente. Además, a diferencia de sistemas que podrían ser de "caja negra", nuestro proyecto documenta de forma abierta su arquitectura de hardware y software, posicionándose como un modelo replicable y adaptable para otras explotaciones del sector agropecuario.

Como parte de estos resultados se puede destacar que este proyecto cobra relevancia porque la población que se dedica a la avicultura en Casanare presenta características específicas que reflejan el contexto rural y productivo del departamento. Algunos aspectos destacables son:

**Predominancia de pequeños y medianos productores rurales:** La mayoría de los avicultores en Casanare son agricultores campesinos y familiares que trabajan combinando esfuerzo propio con la tierra y recursos naturales renovables, dentro de un sistema de agricultura campesina, familiar y comunitaria.

Incluye hombres y mujeres, con presencia de población joven rural que participa activamente en la producción avícola, así como comunidades indígenas, afrodescendientes y raizales ubicadas en distintas zonas del departamento.

Aunque hay avances en cobertura educativa, el promedio de años de estudio puede ser limitado en zonas rurales donde está la actividad avícola, lo que genera la necesidad de capacitación técnica adaptada a las condiciones del adulto rural.

Los avicultores suelen tener una vida comunitaria ligada a la tierra, con formas diversas de tenencia y acceso a la tierra, produciendo tanto para autoconsumo como para venta en mercados locales y regionales.

La avicultura en Casanare, Colombia, es un sector estratégico para la economía rural y la seguridad alimentaria, pero enfrenta varias necesidades y desafíos importantes. Entre las

principales necesidades para las personas del sector avícola en Casanare están: 1) los avicultores requieren acceso a herramientas prácticas, conocimiento actualizado y asesoría técnica para mejorar la producción y enfrentar retos como la salud y cuidado de las aves y la comercialización de productos avícolas, 2) hay una demanda de tecnologías avanzadas que ayuden a aumentar la eficiencia productiva y reducir costos, como incubadoras tecnológicas que disminuyan la mano de obra y la pérdida en los procesos de gestación, 3) demanda de productos avícolas sostenibles está en aumento, haciendo necesaria la adopción de prácticas amigables con el medio ambiente para satisfacer a los consumidores y preservar la raza criolla local.

## Conclusiones

La implementación del sistema de monitoreo basado en IoT demostró ser una herramienta altamente eficaz para registrar de manera continua y confiable las principales variables ambientales en un galpón de pollos de engorde. El sistema permitió identificar fluctuaciones críticas de temperatura, humedad y CO<sub>2</sub>, que no habrían sido evidentes con una supervisión manual esporádica. Este hallazgo práctico confirma lo que sugieren los autores consultados en donde los métodos tradicionales, basados en la intuición, resultan en una gestión ineficiente de recursos, mientras que las tecnologías IoT facilitan la toma de decisiones informadas y mejoran la eficiencia operativa (UNABIZ. (2023). El proyecto evidencia que la digitalización del manejo ambiental es un factor decisivo para mejorar la competitividad de las microempresas avícolas de la región

Los datos recopilados revelaron que, en varios periodos, la humedad relativa superó el rango óptimo del 50-70% establecido por las guías técnicas de Cobb, alcanzando valores por encima del 80% en ambos galpones. Tal como se indica en (COBB-Vantress, 2021), esta condición implica riesgos sanitarios, favoreciendo la proliferación de microorganismos y la degradación de la cama. Asimismo, las mediciones de CO<sub>2</sub> en el Galpón 1 superaron los valores recomendados en ciertos momentos, un claro indicador de una ventilación insuficiente que, según (COBB-Vantress, 2021), puede impactar negativamente la salud y productividad de las aves. Estos hallazgos demuestran la capacidad del sistema para diagnosticar problemas ambientales que, de otra forma, permanecerán ocultos, permitiendo intervenciones correctivas basadas en evidencia.

La plataforma web desarrollada demostró ser una herramienta accesible e intuitiva para los microempresarios avícolas. Su principal implicación práctica es que empodera a los

productores, incluso a aquellos con bajo nivel de tecnificación, para que puedan visualizar datos en tiempo real y tomar decisiones inmediatas para corregir condiciones adversas. Esto es coherente con trabajos previos como el de Herrera Rubio y Ortiz (2022), quienes destacan que la integración de sensores IoT con tecnologías web facilita la supervisión remota y reduce costos operativos. El valor del sistema no es sólo técnico, sino también social, al democratizar el acceso a información clave que antes era inaccesible para pequeños productores.

El proyecto evidenció la importancia crucial de una calibración rigurosa de los sensores para asegurar la precisión de las mediciones y alertas, un aspecto fundamental para futuras implementaciones. Además, se identificó la necesidad de adaptar los sistemas a las condiciones climáticas locales, como en el caso de la alta humedad de Casanare. Este aprendizaje práctico subraya que no existe una solución única; la tecnología debe ser flexible y contextualizada. La arquitectura del sistema, basada en componentes de bajo costo como el ESP8266EX y la plataforma ThingSpeak, se presenta como un modelo replicable y escalable para otras microempresas avícolas en la región y el país, alineándose con el objetivo de promover una transformación digital rural.

Más allá de los objetivos cumplidos, el proyecto sienta las bases para futuras innovaciones. La sistematización de datos históricos abre la posibilidad de aplicar analítica predictiva y machine learning, como se recomienda para el futuro. La implicación práctica de esto es pasar de una gestión reactiva (corregir problemas cuando ocurren) a una proactiva, donde el sistema pueda anticipar problemas ambientales antes de que afecten la producción. Este avance posiciona al proyecto como un primer paso hacia una verdadera Smart Farm en el contexto de la avicultura a pequeña escala.

## Recomendaciones

Frente al desarrollo de este proyecto, en lo que respecta a la plataforma web para la visualización de las mediciones de variables ambientales, se recomienda dar continuidad a la iniciativa mediante un nuevo proyecto que integre una base de datos al sistema actual. Esta integración permitiría implementar funcionalidades como el registro y el inicio de sesión de usuarios, fortaleciendo así su aplicabilidad en contextos académicos y ampliando las posibilidades de personalización y seguimiento de los datos.

Para futuras implementaciones, se recomienda probar dispositivos IoT con sensores de mayor capacidad y precisión, especialmente para variables críticas como CO<sub>2</sub> y material particulado fino (PM2.5 y PM10), lo que permitirá obtener datos más confiables para la toma de decisiones.

Considerar la adaptación del sistema para diferentes escalas de producción avícola y para otros tipos de fincas. Esto permitiría replicar la solución en otras microempresas del departamento y en regiones con condiciones climáticas similar.

Incorporar herramientas de analítica predictiva y machine learning que permitan anticipar condiciones adversas, ajustando automáticamente parámetros como ventilación o temperatura para optimizar el bienestar animal y la eficiencia energética.

Durante la fase de implementación en la finca piloto, el prototipo del dispositivo IoT fue instalado utilizando una estructura de protección básica diseñada para el montaje. Si bien esta solución fue funcional para la prueba de concepto, se reconoce la necesidad de desarrollar una estructura física más robusta y segura para futuras implementaciones a mayor escala.

Para garantizar la durabilidad y protección de los componentes electrónicos en el ambiente de un galpón (caracterizado por polvo, humedad y amoníaco), se recomienda diseñar

una carcasa sellada, que proteja los circuitos sin obstruir las mediciones de los sensores.

Asimismo, una presentación más profesional del prototipo, que integre los componentes en una sola unidad compacta, no solo mejoraría su seguridad y vida útil, sino que también facilitaría su instalación y aceptación por parte de los productores, un factor clave para la adopción tecnológica en el sector.

### Referencias Bibliográficas

- Amazon Web Services. (s.f.) ¿Qué es MQTT?. <https://aws.amazon.com/es/what-is/mqtt/>  
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4375>
- Cardacci, D. G. (2015). *Arquitectura de software académica para la comprensión del desarrollo de software en capas* (No. 574). Serie Documentos de Trabajo.  
<https://hdl.handle.net/10419/130825>
- Castillo Quiroz, G., Cruz Garrido, A., Gonzaga Licon, E., & Luna Mejía, E. (2019). Diseño e implementación de sistema de monitoreo automatizado en granja avícola. *Revista De Investigación En Tecnologías De La Información*, 7(14), 122–136.  
<https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.011>
- Cárdenas Escalante, L. (2013). El patrón de arquitectura n-capas con orientación al dominio como solución en el diseño de aplicaciones empresariales. *Tecnología Y Desarrollo* (Trujillo), 11(1), 59–66. <https://doi.org/10.18050/td.v11i1.679>
- Cevallos Apolo, R. D. y Rivera Guerra, R. A. (2023). Automatización de pruebas unitarias y de integración del sistema AGATA. [Proyecto integrador]. ESPOL. FIEC, Guayaquil. 86p.  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/58199>
- Chanchí Golondrino, G. E., Ordóñez Salinas, L. F., & Guerrero, F. A. (2021). Sistema IoT para el monitoreo de variables ambientales en un ambiente laboral. *Revista Social Fronteriza*, 4(1), e41117. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(1\)117](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(1)117)
- Cobb-Vantress. (2021). *Cobb Broiler Management Guide*. Cobb-Vantress Inc.  
<https://www.cobb-vantress.com/resource/management-guides>
- Cooper, A., Reimann, R., & Cronin, D. (2007). *About Face 3: The Essentials of Interaction Design*. Indianapolis: Wiley Publishing.

- Espinoza Velasco, H. J. (2023). Aplicación de una red de sensores inalámbricos (WNS) en una granja avícola para producción de precisión.  
<http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11506>
- FAO. (2013). Revisión del desarrollo avícola. <https://www.fao.org/4/i3531s/i3531s.pdf>
- Fernández, R., & Gómez, S. (2020). Eficiencia energética en el sector agropecuario: Estrategias y beneficios. *Revista de Energía y Sostenibilidad*, 5(2), 45-60.
- García-Peñalvo, F. J., Moreno-García, M. N., García-Holgado, A., & Vázquez-Ingelmo, A. (2021). UML. Unified Modeling Language. <http://repositorio.grial.eu/handle/grial/2195>
- García, M., & Pérez, L. (2021). Aplicaciones del Internet de las Cosas en la agricultura de precisión. *Revista de Tecnología Agrícola*, 45(3), 125-138.
- Gómez, U. E., Pérez, J. P., & Ramírez, J. L. (2016). Sistema de información agrícola para la disminución de brechas entre oferta y demanda - AGROCRAFT. *Información Tecnológica*, 27(3), 215–220 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000300020>
- Herrera Rubio, J. E., & Ortiz E, V. J. (2022). Implementación de un sistema de monitoreo y control con tecnología IoT para determinar el comportamiento de las variables ambientales en la avicultura. *Investigación E Innovación En Ingenierías*, 10(1), 30–41.  
<https://doi.org/10.17081/invinno.10.1.5016>
- Hilarón Novoa, F. J., Bojacá Garavito, E. A., & Bojacá Bojacá, D. M. (2020). Diseño y simulación de un sistema automatizado para producción avícola en la región del Guavio. *Inventum*, 15(28), 3–32. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.3-32>
- Lara Silva, T. M., Velásquez Parrales, K. M., Herrera Núñez, E. F., Guillen Gavilanes, M. D., & Bautista Rivas, J. G. (2024). Desarrollo y control de un prototipo de brazo robótico con 3 grados de libertad usando la tarjeta de desarrollo ESP32 S2 Mini.: Development and

control of a robotic arm prototype with 3 degrees of freedom using the ESP32 S2 Mini development board. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando*, 5(2), Pág. 294 – 309.  
<https://doi.org/10.60100/rcmg.v5i2.272>

Lozada, M.; Moncayo, C. (2021). *Diseño de interfaz web informativa sobre ecuatorianas icónicas en Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas*. [Tesis de Grado]. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56293>

MathWorks, inc (2025). About ThingSpeak. <https://thingspeak.mathworks.com>

Malliquinga Tenezaca, R. R., & Villacís Cañar, F. R. (2017). *Implementación de un sistema automatizado de control de variables ambientales de temperatura y dosificación de agua en la crianza de pollitas ponedoras en la Empresa Avícola Ecuatoriana AVESCA CA*.

<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/4375>

MOZILLA. (2024). HTML: Lenguaje de etiquetas de hipertexto.

<https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTML>

MOZILLA. (2024). CSS: Hojas de Estilo en Cascada.

<https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/CSS>

MOZILLA. (2024). JavaScript (JS). <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/JavaScript>

Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/>

Moreira Rosales, L. V., Morocho Ramos, J. E., Naranjo Armijo, F. G., & Benalcazar Paladines, M. E. (2019). *Dificultades en la microempresa, Granja Avícola «M&R» en la ciudad de Santo Domingo (Ecuador)*. *Revista Espacios*, 40(38), 2.

<http://www.revistaespacios.com/a19v40n38/a19v40n38p02.pdf>

Organización Internacional de Normalización. (2018). ISO 50001:2018 Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso. Ginebra: ISO.

Smith, J., & Thompson, A. (2019). Long Range Wireless Communication Protocols for IoT in Agriculture. *Journal of Agricultural Technology*, 12(4), 210-223.

UNABIZ. (2023). Smart Farming: la importancia de la tecnología y las soluciones IoT para el sector avícola. <https://www.unabiz.es/smart-farming-la-importancia-de-la-tecnologia-y-las-soluciones-iot-para-el-sector-avicola/>

Vidal, Cristian L, Schmal, Rodolfo F, Rivero, Sabino, & Villarroel, Rodolfo H. (2012). Extensión del Diagrama de Secuencias UML (Lenguaje de Modelado Unificado) para el Modelado Orientado a Aspectos. *Información tecnológica*, 23(6), 51-62.  
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000600007>

## Apéndices

### Apéndice A

#### *Repositorio del Código Fuente del Sistema Desarrollado*

El código fuente de la plataforma web diseñada para la visualización de variables ambientales, así como su documentación técnica, puede consultarse en el siguiente repositorio:

<https://github.com/ramtako8922/smartfarming>

**Apéndice B***Registro de Datos de los Dispositivos IoT por cada Galpón de Prueba*

El registro de los datos de cada galpón se encuentra en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/15g1grG8Zu856HdcJZG8DaDj7-Nl6sCPJ?usp=sharing>

## **Apéndice C**

### *Capturas del Proceso de Desarrollo de la Aplicación Web*

Las capturas se pueden encontrar en el siguiente enlace

<https://docs.google.com/document/d/1BhhxCRZkGKdBOwt-erTG0xNQqTbqmvBHiXDAWo5carc/edit?usp=sharing>