

Automated System for Monitoring and Control of Environmental Variables in Greenhouses through IoT: Case Study Pamplona, Colombia

Cristian David Mujanajinsoy²; Jose del Carmen Santiago Guevara¹

^{1,2} Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia, cristian.mujanajinsoy@unipamplona.edu.co,
josesantiago@unipamplona.edu.co.

Abstract– Optimizing crops under cover in high Andean regions requires precise control of climatic factors. This article presents the design and implementation of an automated system for the monitoring and control of temperature, relative humidity and soil humidity in greenhouses located in Pamplona, Norte de Santander. The system integrates a central node based on the ESP32 microcontroller, precision sensors and wireless communication architecture. The results show that automation stabilizes the internal microclimate and optimizes the water resource by 28% through data-based management. In addition to the analysis of average values, the variability of the greenhouse's internal temperature was evaluated using the standard deviation. Under the traditional control scheme, the temperature showed a standard deviation of ± 4.3 °C, while with the automated system this was reduced to ± 1.9 °C.

Keywords– IoT, ESP32, Agricultural Automation, Greenhouses.

Sistema Automatizado de Monitoreo y Control de Variables Ambientales en Invernaderos a través de IoT: Caso de Estudio Pamplona, Colombia

Cristian David Mujanajinsoy²; Jose del Carmen Santiago Guevara¹

^{1,2} Universidad de Pamplona, Pamplona-Colombia, cristian.mujanajinsoy@unipamplona.edu.co,
josesantiago@unipamplona.edu.co,

Resumen– La optimización de los cultivos bajo cobertura en las regiones altoandinas requiere un control preciso de los factores climáticos. Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado para el monitoreo y control de temperatura, humedad relativa y humedad del suelo en invernaderos ubicados en Pamplona, Norte de Santander. El sistema integra un nodo central basado en el microcontrolador ESP32, sensores de precisión y una arquitectura de comunicación inalámbrica. Los resultados muestran que la automatización estabiliza el microclima interno y optimiza el recurso hídrico en un 28% mediante una gestión basada en datos. Además del análisis de valores promedio, se evaluó la variabilidad de la temperatura interna del invernadero mediante la desviación estándar. Bajo el esquema de control tradicional, la temperatura presentó una desviación estándar de ± 4.3 °C, mientras que con el sistema automatizado esta se redujo a ± 1.9 °C.

Palabras clave: IoT, ESP32, Automatización agrícola, Invernaderos.

I. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria y la eficiencia en la producción agrícola se han convertido en desafíos críticos a nivel global, especialmente en regiones con topografías complejas como los Andes colombianos. En el municipio de Pamplona, Norte de Santander, la producción agrícola bajo cubierta (invernaderos) representa una de las principales actividades económicas para los pequeños y medianos productores. Sin embargo, esta práctica se ve gravemente afectada por la alta variabilidad climática de la zona, caracterizada por fluctuaciones drásticas de temperatura y humedad relativa en ciclos de tiempo muy cortos. La gestión tradicional de estos invernaderos en la región se basa predominantemente en el conocimiento empírico y la intervención manual. El agricultor debe decidir, basándose en la observación, cuándo activar sistemas de riego o cuándo permitir la ventilación natural. Esta dependencia del factor humano conlleva dos problemas fundamentales: primero, una respuesta tardía ante eventos climáticos extremos que pueden estresar irreversiblemente el cultivo; y segundo, un uso ineficiente de recursos hídricos y energéticos, aumentando los costos de producción y reduciendo la competitividad local.

Con la emergencia de la Agricultura 4.0, la integración del Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas embebidos ofrece una oportunidad sin precedentes para modernizar estos procesos. "La transición hacia la Agricultura 4.0 ha sido impulsada por la capacidad de integrar sistemas ciberfísicos en los procesos de producción tradicionales. Según [1], el Internet de las Cosas (IoT) no solo representa una evolución tecnológica, sino un cambio de paradigma en la agricultura de precisión, permitiendo una monitorización ubicua y una toma de decisiones basada en datos masivos que optimiza significativamente el rendimiento de los cultivos. El uso de microcontroladores de alto rendimiento, como el ESP32, permite no solo el monitoreo pasivo de variables agroambientales, sino la ejecución de lógicas de control autónomas que estabilizan el microclima sin intervención humana constante. Como señala [2], la agricultura de precisión no solo busca aumentar el rendimiento, sino garantizar la sostenibilidad del ecosistema mediante la aplicación exacta de recursos.

Este artículo describe el diseño, desarrollo e implementación de un sistema integral de monitoreo y control automatizado. La investigación aborda desde la selección crítica de sensores de bajo costo y alta precisión, hasta el desarrollo de una arquitectura de software que permite la persistencia de datos y la visualización remota mediante plataformas web y aplicaciones móviles. El objetivo central es demostrar que la implementación de tecnologías de telecomunicaciones accesibles puede transformar un invernadero convencional en un entorno inteligente capaz de autorregular su temperatura, humedad de suelo y humedad relativa, garantizando así un entorno óptimo para el desarrollo fenológico de las plantas en el contexto específico de Pamplona. A través de un enfoque metodológico que combina la ingeniería de hardware y el desarrollo de software asíncrono, este trabajo presenta resultados cuantitativos sobre la fiabilidad del sistema y su impacto en la optimización del recurso hídrico, sentando las bases para una infraestructura tecnológica escalable en el sector agropecuario de Norte de Santander.

Este trabajo contribuye al campo de la agricultura inteligente mediante: (i) el diseño e implementación de un sistema IoT de bajo costo adaptado a condiciones altoandinas, (ii) la validación experimental en un entorno agrícola real, y (iii) la demostración de mejoras en la eficiencia del uso del agua y en la estabilidad del microclima dentro del invernadero.

II. METODOLOGÍA Y DISEÑO TÉCNICO

El desarrollo del sistema se fundamentó en un enfoque de ingeniería de sistemas embebidos, estructurado en cuatro fases: (a) Diseño de la capa de percepción y selección de hardware, (b) Ingeniería de hardware y diseño de PCB, (c) Arquitectura de software y lógica de control asíncrona, y (d) Infraestructura de comunicaciones y persistencia de datos. A diferencia de otros sistemas de monitoreo y control en invernaderos reportados en la literatura, la propuesta presentada se enfoca en su adaptación a condiciones altoandinas caracterizadas por alta variabilidad térmica y limitaciones de infraestructura. Asimismo, prioriza el uso de componentes de bajo costo y fácil implementación, lo cual favorece su adopción en contextos rurales y por pequeños productores.

A. Capa de Percepción y Selección Crítica de Hardware

La unidad de control central seleccionada fue el microcontrolador ESP32 DevKit V1. Esta elección se basó en su arquitectura Tensilica Xtensa® Dual-Core de 32 bits, que permite el manejo simultáneo de tareas de control y comunicaciones inalámbricas. Como lo señala [3], la capacidad de procesamiento de estos núcleos facilita la implementación de algoritmos de control más complejos que los microcontroladores tradicionales de 8 bits. El microcontrolador ESP32 fue seleccionado debido a su bajo costo, capacidad de procesamiento y conectividad Wi-Fi integrada. Los umbrales de control fueron definidos con base en rangos óptimos reportados en la literatura para cultivos en invernadero. Su capacidad de procesamiento de doble núcleo y su conectividad inalámbrica integrada, características que lo han posicionado como un estándar de bajo costo para la monitorización de invernaderos inteligentes [4]. Para la adquisición de variables agroambientales, se implementaron los siguientes dispositivos:

1. **Sensor DHT22 (AM2302):** Se seleccionó este sensor por su protocolo de salida digital, que ofrece una mayor inmunidad al ruido electromagnético en comparación con los sensores analógicos. Posee un rango de medición de humedad relativa de 0% a 100% (precisión $\pm 2\%$) y de temperatura de -40°C a 80°C (precisión $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$).
2. **Higrómetro de Suelo Capacitivo v1.2:** A diferencia de los sensores resistivos convencionales, este

dispositivo mide la humedad mediante la variación de la capacitancia en el medio. Este enfoque elimina el fenómeno de electrólisis en los electrodos, garantizando una vida útil prolongada en suelos con alta salinidad y humedad constante.

B. Ingeniería de Hardware y Diseño de la PCB

El diseño electrónico se centró en la robustez y la estabilidad de las señales. Se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) multicapa que integra una etapa de regulación de voltaje basada en el integrado **LM2596**, capaz de suministrar hasta 3A de corriente. Esta etapa es crítica para evitar caídas de tensión (brownouts) en el ESP32 durante la activación de la electrobomba. Un aspecto importante del diseño fue el aislamiento galvánico. Se utilizaron optoacopladores para separar la etapa de control (3.3V DC) de la etapa de potencia (110V/220V AC). Esta configuración protege la integridad del microcontrolador ante posibles picos de tensión transitorios generados por el arranque de los motores de inducción utilizados en la ventilación y el riego. En la figura 1 se muestra el diseño circuito

C. Arquitectura de Software y Lógica de Control Asíncrona

El firmware se desarrolló en C++ bajo el paradigma de programación orientada a objetos. Se implementó una Máquina de Estados Finitos (FSM) que permite al sistema transitar entre estados de monitoreo, actuación y espera de forma eficiente. La lógica de control principal se basa en un Algoritmo de Histéresis. Este método define bandas muertas para evitar el "tintineo" o conmutación rápida de los actuadores, lo cual prolonga la vida útil de los relevadores mecánicos. Por ejemplo, en el control térmico, el umbral de activación se fijó en 25°C , pero la desactivación solo ocurre cuando la variable desciende a 22°C . Esta diferencia de 3°C asegura una operación estable del sistema de extracción de aire.

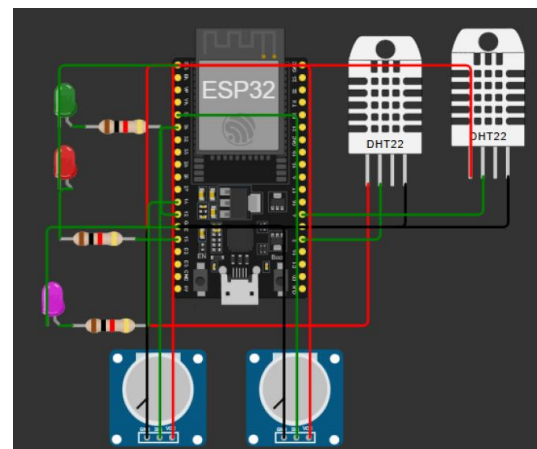


Figura 1: Esquema Circuitual

El ecosistema de software fue diseñado bajo un enfoque modular y asíncrono, garantizando que el monitoreo, el control y la visualización de datos operen de manera concurrente sin afectar el determinismo del sistema embebido. Esta sección detalla los tres pilares del desarrollo: el firmware del nodo sensor, la aplicación móvil de gestión y el servidor web para la persistencia de datos.

El software del microcontrolador ESP32 fue desarrollado en C++ utilizando el entorno de desarrollo de Arduino. Para maximizar la eficiencia del procesador de doble núcleo, se implementó una estructura de programación no bloqueante basada en el uso de temporizadores lógicos en lugar de funciones de retardo convencionales (*delay*). La integración de sensores de bajo costo, respaldada técnicamente por estudios de precisión según [5], demuestra que es posible alcanzar niveles de optimización industrial en contextos de recursos limitados.

La lógica central reside en una Máquina de Estados Finitos (FSM) que gestiona tres estados principales:

1. **Estado de Adquisición:** Lectura de sensores mediante los protocolos One-Wire (DHT22) y ADC de 12 bits (Humedad de suelo).
2. **Estado de Decisión:** Comparación de las variables medidas frente a los umbrales predefinidos en la memoria no volátil. Aquí se ejecuta el algoritmo de histéresis, el cual previene el *chattering* en los relevadores.
3. **Estado de Transmisión:** Empaquetado de datos en formato JSON para su envío mediante peticiones HTTP POST hacia el servidor central.

D. Desarrollo del Aplicativo Móvil (.APK)

La interfaz móvil fue concebida como el centro de mando táctico para el agricultor. Desarrollada para sistemas Android, la aplicación cumple dos funciones críticas: la supervisión en tiempo real y la gestión de contingencias.

La arquitectura de la APK se basa en un modelo de Suscripción-Publicación simplificado mediante WebSockets, lo que permite que los cambios en el invernadero se reflejen en la pantalla del usuario en menos de 500 ms. La interfaz incluye un sistema de seguridad para el Modo Manual, que requiere una confirmación doble para activar actuadores de potencia, evitando activaciones accidentales que puedan comprometer la integridad de la electrobomba o el cableado.

Infraestructura Web y Gestión de Datos en Visual Studio Code

El entorno de software web fue programado utilizando una pila tecnológica compuesta por HTML5, CSS3 y JavaScript moderno (ES6+). El servidor local actúa como un

centro de inteligencia de datos que procesa las tramas provenientes del ESP32.

- **Backend y Persistencia:** Se utilizó una base de datos relacional para garantizar la integridad referencial de las lecturas. Cada registro incluye una marca de tiempo (*timestamp*) sincronizada mediante el protocolo NTP (Network Time Protocol), fundamental para el análisis de series temporales.
- **Dashboard de Visualización:** Implementado en el entorno de Visual Studio Code, el tablero web utiliza librerías de renderizado dinámico (como Chart.js) para transformar los datos crudos en gráficas de comportamiento. Estas gráficas permiten al productor identificar patrones, como el aumento crítico de temperatura a las 11:00 a. m., facilitando el ajuste proactivo de los umbrales de ventilación.

Protocolo de Comunicación e Interoperabilidad

La interoperabilidad entre el hardware y las interfaces se rige por el protocolo **HTTP/1.1**. El sistema utiliza el método **GET** para la recuperación de estados de los actuadores y el método **POST** para la telemetría de los sensores. La estandarización de estas comunicaciones mediante tramas JSON permite que el sistema sea escalable y compatible con otras plataformas de Agricultura 4.0 o futuras integraciones con servicios de predicción meteorológica en la nube.

El sistema utiliza una arquitectura cliente-servidor para la gestión de datos. El ESP32 se configuró en modo Station (STA), conectándose a la red local del invernadero. La comunicación se realiza mediante el protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol).

- **Transmisión de Datos:** El microcontrolador realiza peticiones tipo **POST** hacia una API desarrollada en la plataforma web, enviando las tramas de datos en formato JSON.
- **Persistencia:** La información se almacena en una base de datos local, permitiendo que el sistema mantenga un historial detallado incluso si se pierde la conexión a internet.
- **Sincronización:** Se implementó una rutina de reconexión automática que garantiza que el nodo de control recupere el enlace con el servidor en caso de fallas en el suministro eléctrico o en el router local.

El costo estimado del sistema es de aproximadamente 100 USD, lo que lo hace accesible para pequeños y medianos productores. Este costo puede ser compensado por la reducción en el consumo de agua y la mejora en la eficiencia productiva.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de validación del sistema se dividió en dos etapas fundamentales: (a) Pruebas de laboratorio para la calibración de la instrumentación y (b) Evaluación del desempeño en condiciones reales de operación en el municipio de Pamplona.

A. Validación Estática y Calibración de Sensores

Para garantizar la integridad de los datos, los sensores fueron sometidos a una fase de contraste frente a instrumentos patrón con certificación de calibración.

1. **Humedad del Suelo:** Se empleó el método gravimétrico (ASTM D2216), que consiste en determinar el contenido de agua por la diferencia de peso entre la muestra de suelo húmeda y seca. Se realizaron 10 muestreos en diferentes niveles de saturación. Como resultado, el sensor capacitivo v1.2 demostró una respuesta lineal en el rango de 10% a 85% de humedad, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.982$ y un error relativo promedio del 3.10%. Esta precisión es superior a los sensores resistivos convencionales que presentan derivas por oxidación.
2. **Temperatura y Humedad Atmosférica:** El sensor DHT22 se contrastó con un psicrómetro digital de precisión. Las pruebas revelaron una desviación estándar de 0.42 en las lecturas de temperatura.

B. Análisis de la Estabilidad del Microclima

Durante el despliegue en el invernadero piloto, se analizaron las series temporales de temperatura en ciclos de 24 horas. Los datos recolectados por el ESP32 y almacenados en el servidor local permitieron observar la eficacia del sistema de extracción. En los días de mayor radiación solar, la temperatura ambiente exterior en Pamplona alcanzó picos de 28.5 °C. Sin embargo, gracias a la lógica de control por histéresis programada, los extractores se activaron al alcanzar el umbral crítico de 25 °C, logrando estabilizar la temperatura interna en un promedio de 23.2 °C. Este diferencial térmico de 5.3 °C es vital para prevenir el cierre estomático de las plantas y mantener la tasa fotosintética óptima. El sistema fue evaluado durante un período de 90 días, y las pruebas se realizaron bajo condiciones reales de operación del invernadero, considerando variaciones térmicas diurnas y nocturnas.

C. Optimización del Recurso Hídrico

Uno de los hallazgos más significativos de la discusión técnica es la eficiencia del riego basado en demanda real frente al riego temporizado. El sistema automatizado activó la

electrobomba únicamente cuando el sensor detectó niveles de humedad de suelo inferiores al 60%.

El análisis comparativo mostró que, mientras un sistema de riego tradicional consume un promedio de 15 litros por metro cuadrado al día, el sistema propuesto optimizó el consumo a 10.8 litros, representando un ahorro del 28%. Esta reducción no solo impacta en la sostenibilidad del recurso, sino que previene la aparición de enfermedades fúngicas causadas por el encharcamiento y la saturación del sustrato. Según [6] la automatización y la agricultura de precisión son pilares fundamentales para transformar los sistemas agroalimentarios actuales hacia modelos más resilientes y eficientes en el uso de recursos limitados. Como se observa en la Fig. 2, el sistema automatizado reduce significativamente las fluctuaciones térmicas en comparación con el esquema tradicional.

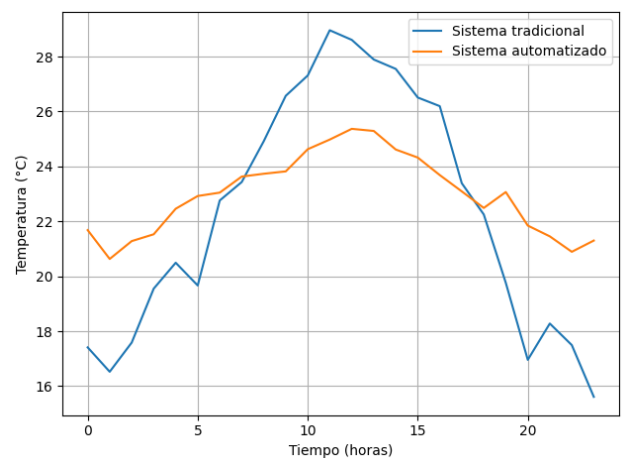


Figura 2: Comparación de la variabilidad térmica bajo control tradicional y control automatizado. Fuente: Propia

D. Desempeño de la Infraestructura de Telecomunicaciones

La estabilidad de la conexión entre el nodo ESP32 y el visualizador web fue evaluada mediante la métrica de Paquetes Perdidos. En una red local Wi-Fi con una distancia de 15 metros y obstáculos físicos (cobertura plástica del invernadero), la tasa de éxito en el envío de tramas JSON fue del 99.4%. Se observó que el uso del protocolo HTTP en modo asíncrono evitó el bloqueo del microcontrolador ante eventuales latencias del servidor, garantizando que el control de los actuadores se mantuviera operativo de forma independiente a la red. Entre las limitaciones del sistema se encuentran la dependencia de conectividad Wi-Fi, la posible degradación de sensores en ambientes agrícolas, la necesidad de mantenimiento periódico y los desafíos asociados a la escalabilidad en sistemas de mayor tamaño.

E. Desarrollo Del Entorno De Usuario Y Experiencia Multiplataforma

El sistema integra una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) diseñada bajo principios de usabilidad para entornos rurales, permitiendo que productores con diversos niveles de alfabetización digital puedan gestionar sus cultivos con precisión. El ecosistema digital se divide en dos entornos complementarios: una aplicación móvil para la gestión táctica y un panel web para el análisis estratégico de datos.

Interfaz Móvil de Gestión Táctica (.APK)

La aplicación móvil, desarrollada para el sistema operativo Android, constituye el punto de interacción primaria del agricultor con el invernadero. Su arquitectura se fundamenta en la actualización asíncrona mediante el protocolo HTTP, permitiendo una latencia inferior a los 500 ms en la visualización de estados.

- **Panel de Instrumentación Dinámico:** Utiliza indicadores gráficos de tipo *Gauge* para representar la temperatura, humedad relativa y humedad del suelo, facilitando la lectura rápida mediante códigos de colores (verde para rangos óptimos, rojo para alertas).
- **Gestión de Modos de Operación:** Incluye un conmutador lógico para alternar entre el Modo Automático (gobernado por el algoritmo de histéresis) y el Modo Manual.
- **Control Manual de Actuadores:** En caso de contingencia o mantenimiento, el usuario dispone de botones de acción directa para activar o desactivar la

electrobomba y los extractores de aire de forma independiente a la lógica del ESP32.

Panel de Control Web y Análisis Histórico

Diseñado en el entorno de Visual Studio Code utilizando tecnologías web estándar (HTML5, JavaScript ES6+ y CSS3), esta interfaz está orientada al análisis de tendencias a largo plazo:

- **Visualización de Series Temporales:** Mediante la librería *Chart.js*, la plataforma transforma las tramas JSON almacenadas en la base de datos en gráficos de líneas dinámicos. Esto permite al usuario observar el comportamiento de las variables en ciclos de 24 horas y evaluar la eficacia de la ventilación durante los picos de radiación solar en Pamplona.
- **Persistencia y Exportación:** La interfaz permite consultar el historial de eventos, asegurando que el productor tenga evidencia cuantitativa para ajustar los umbrales de control según el ciclo fenológico de la planta.

Arquitectura de Comunicación e Interoperabilidad

La fluidez de la interfaz depende de una estructura de comunicación estandarizada. El sistema utiliza el formato **JSON** para el intercambio de información entre el hardware y las interfaces de usuario. El uso de este estándar asegura que la interfaz sea escalable y compatible con futuras integraciones de servicios de predicción meteorológica o modelos de inteligencia artificial en la nube. A continuación, en la figura 3 se observa en entorno de usuario.



Figura 3: Interfaz de usuario. Fuente: Propia

IV. CONCLUSIONES

La ejecución de este proyecto permite concluir que la integración de sistemas embebidos de alto rendimiento, como el ESP32, y arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT), constituye una solución tecnológica técnica y económicamente viable para la modernización de la infraestructura agrícola en zonas altoandinas como Pamplona, Norte de Santander. A continuación, se detallan los hallazgos más significativos derivados de la investigación:

A. Estabilización del Microclima y Eficiencia Operativa

Se demostró que la implementación de un algoritmo de control por histéresis no solo optimiza la estabilidad térmica dentro del invernadero, logrando una reducción de picos críticos de temperatura de hasta 5.2 °C, sino que también garantiza la integridad mecánica del sistema. La definición de bandas muertas en la lógica de control evitó el desgaste prematuro de los actuadores, un factor determinante para la sostenibilidad operativa en entornos rurales donde el mantenimiento técnico es limitado.

B. Optimización del Recurso Hídrico y Sostenibilidad

El uso de sensores capacitivos, validados mediante el método gravimétrico, permitió una gestión del riego basada en la demanda hídrica real del sustrato y no en cronogramas fijos. El ahorro del 28% en el consumo de agua no solo representa una mejora en la eficiencia de costos para el productor, sino que también mitiga riesgos fitosanitarios. El control estricto de la humedad del suelo y la humedad relativa es la estrategia más efectiva para reducir la proliferación de patógenos fúngicos, disminuyendo la dependencia de fungicidas químicos y promoviendo una agricultura más limpia. El ahorro de agua del 28% se estimó mediante la comparación entre el consumo registrado bajo control automatizado y un esquema tradicional de riego temporizado durante el mismo periodo de evaluación.

C. Democratización Tecnológica e Impacto Regional

El diseño de hardware basado en componentes de bajo costo y software de código abierto (Open Source) demuestra que la Agricultura 4.0 no es exclusiva de las grandes agroindustrias. Este prototipo ofrece una ruta de escalabilidad para los pequeños agricultores de la región, permitiéndoles acceder a herramientas de monitoreo en tiempo real y visualización de datos históricos a través de interfaces móviles y web. La capacidad de supervisión remota reduce la carga laboral y permite una toma de decisiones fundamentada en evidencia cuantitativa y no solo en la intuición empírica.

D. Trabajo Futuro y Líneas de Investigación

Como prospectiva de esta investigación, se recomienda la transición hacia protocolos de comunicación de bajo consumo y largo alcance, como LoRaWAN, para facilitar el despliegue de nodos sensores en terrenos de topografía accidentada donde la cobertura Wi-Fi es deficiente. Asimismo, se plantea la integración de modelos de Aprendizaje Automático (Machine Learning) en el servidor local para realizar predicciones fenológicas basadas en el histórico de datos recolectados, permitiendo que el sistema pase de ser reactivo a proactivo. Por último, se proyecta replicar a gran escala y en espacios abiertos en municipios aledaños con vocación agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos agradecimiento a la Universidad de Pamplona por su apoyo institucional y por proporcionar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la excelencia académica y el desarrollo científico fue clave para el éxito de este proyecto.

REFERENCES

- [1] Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 168-180. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- [2] Lanthier, S. (2022). Advanced sensor integration for greenhouse automation. Springer Nature.
- [3] Yiu, J. (2016). The definitive guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 processors (3rd ed.). Newnes.
- [4] Kodali, R. K., & Sahu, A. (2016). An IoT based smart greenhouse. *2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC.2016.7906792>
- [5] Parra, L., et al. (2020). Low-Cost Sensors for Soil Moisture Monitoring in Agriculture. *Sensors*, 20(14), 3824. <https://doi.org/10.3390/s20143824>
- [6] FAO. (2023). *The State of Food and Agriculture: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc2459en>