

Implementación de un sistema telemático para monitorear y controlar invernaderos en un campus universitario, optimizando la agricultura sostenible

Implementation of a telematics system to monitor and control greenhouses on a university campus, optimizing sustainable agriculture

Anthony L. Morán Cabezas^a, Shirley S. Casquete Menéndez^b, Jefferson L. Morán Cabezas^c

Abstract:

The current recognition of the importance of agriculture as a fundamental pillar of global food security, coupled with the pressing need to address environmental challenges, has underscored the urgency of adopting sustainable agricultural practices. In this context, the implementation of innovative systems that enhance efficiency and management in agriculture becomes crucial. Aligned with this need, the present study focuses on the development of a telematic system for advanced monitoring and control of greenhouses. Key environmental monitoring requirements were identified, and a telematic network with an intuitive user interface was designed. Through an experimental approach, utilizing both qualitative and quantitative methods, a case study was conducted on a university campus. Preliminary results highlighted successful integration of the system, although the need for further validation was acknowledged. Ultimately, this study underscores the efficacy of the proposed telematic system, emphasizing the importance of the identified requirements and the effectiveness of the utilized network infrastructure.

Keywords:

Agricultural Management, Telematics System, University Greenhouses, Successful Integration.

Resumen:

El reconocimiento actual de la importancia de la agricultura como pilar fundamental de la seguridad alimentaria mundial, junto con la necesidad imperante de abordar los desafíos ambientales, ha destacado la urgencia de adoptar prácticas agrícolas sostenibles. En este contexto, la implementación de sistemas innovadores que mejoren la eficiencia y la gestión en la agricultura se vuelve crucial. En línea con esta necesidad, el presente trabajo se centra en el desarrollo de un sistema telemático para el monitoreo y control avanzado de invernaderos. Se identificaron requisitos clave de monitoreo ambiental y se diseñó una red telemática con una interfaz de usuario intuitiva. A través de un enfoque experimental, utilizando métodos cualitativos y cuantitativos, se llevó a cabo un caso de trabajo en un campus universitario. Los resultados preliminares destacaron una integración exitosa del sistema, aunque se reconoció la necesidad de validación adicional. En última instancia, esta investigación resalta la eficacia del sistema telemático propuesto, subrayando la importancia de los requisitos identificados y la efectividad de la infraestructura de red utilizada.

Palabras Clave:

Gestión Agrícola, Sistema Telemático, Invernaderos Universitarios, Integración exitosa.

Introducción

En la actualidad, la agricultura enfrenta desafíos considerables derivados del aumento demográfico y el cambio climático (Vijh et al., 2024), lo que ha generado una urgente necesidad de incrementar la productividad y asegurar la disponibilidad de alimentos a nivel global. En este contexto, los invernaderos se presentan como una solución promisoriosa, al permitir un control preciso de las

condiciones ambientales y ofrecer protección contra elementos adversos (Priandana & Wahyu, 2020).

El crecimiento en la demanda de alimentos ha impulsado la adopción de tecnologías destinadas a mejorar la eficiencia en los invernaderos (Anand et al., 2022). Entre estas tecnologías, los sistemas telemáticos han demostrado ser herramientas indispensables al proporcionar un monitoreo y control en tiempo real de los

^a Autor de Correspondencia, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, <https://orcid.org/0009-0005-2734-8474>, Email: amoranc5@uteq.edu.ec

^b Universidad Técnica Estatal de Quevedo, <https://orcid.org/0009-0005-4253-8276>, Email: shirley.casquete2@uteq.edu.ec

^c Universidad Técnica Estatal de Quevedo, <https://orcid.org/0000-0003-2097-5027>, Email: jmoranc6@uteq.edu.ec

factores que inciden en el crecimiento de los cultivos, tales como la temperatura, la turbidez del agua y el pH. Esta capacidad de recopilar datos precisos y ajustar las condiciones de forma remota permite optimizar el rendimiento de los cultivos (Leong et al., 2023).

Este artículo se enmarca dentro del ámbito de la e-agricultura, una disciplina que busca integrar las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura con el propósito de mejorar la toma de decisiones y optimizar el uso de los recursos disponibles. Con esta iniciativa, se busca avanzar en la agricultura de precisión, posibilitando un manejo más eficiente y sostenible de los invernaderos, lo que se traduce en una mayor calidad y rendimiento de los cultivos (Tondato De Faria et al., 2022).

El equipo de investigación, contará con la participación de expertos en agricultura para garantizar la relevancia y precisión del sistema. En adelante, la presente investigación está organizada de la siguiente manera: primero, se proporciona una revisión literaria sobre la aplicación de la e-agricultura en invernaderos. A continuación, se describe la metodología empleada para llevar a cabo el análisis. Finalmente, se exponen los principales hallazgos y conclusiones obtenidos, con la perspectiva de contribuir al desarrollo de futuros estudios en esta área.

Viabilidad de sistemas telemáticos en invernaderos

Los entornos agrícolas y hortícolas están siendo ampliamente transformados debido a desafíos globales como el crecimiento demográfico, el cambio climático y la urbanización (Liu et al., 2021). Los agricultores enfrentan una preocupación global cada vez mayor para satisfacer las crecientes demandas de alimentos, exacerbada por los cambios climáticos bruscos y las condiciones impredecibles del clima, lo que aumenta la presión sobre su labor (Panwar, Kaushik, & Kothari, 2011). En consecuencia, se requiere una reestructuración esencial de la industria agrícola tradicional para garantizar un suministro de alimentos que sea respetuoso con el medio ambiente y sostenible. Se contempla que la adopción de prácticas agrícolas innovadoras, como la agricultura en invernadero y el empleo de tecnología agrícola avanzada, constituyen alternativas viables para fomentar la seguridad alimentaria y preservar la sostenibilidad socioecológica en el futuro (Tiwari, 2003).

La agricultura de precisión está transformando la industria agrícola mediante el uso de tecnologías avanzadas (Morales-García et al., 2023). Esta se centra en el monitoreo de rendimiento, la aplicación de tasas variables

y los sistemas de agricultura guiada. Estas innovaciones buscan mejorar aún más la eficiencia y la sostenibilidad en la producción agrícola. La agricultura bajo invernadero se presenta como una técnica que proporciona un mayor dominio sobre las condiciones de cultivo, lo que conlleva una mejora en el rendimiento y la calidad de los cultivos. Esta estrategia se vale de ambientes controlados para maximizar el desarrollo de las plantas, lo que promete alcanzar niveles de producción superiores en comparación con los métodos agrícolas convencionales (Karanisa et al., 2022). La tecnología de cultivo en invernadero, que tuvo sus primeras implementaciones comerciales en los Países Bajos y Francia en el siglo XIX, ha experimentado un crecimiento vertiginoso desde entonces, convirtiéndose en una de las industrias de mayor desarrollo a nivel global (Vatari, Bakshi, & Thakur, 2016).

Sin embargo la Agricultura de Ambiente Controlado (CEA) enfrenta diversos desafíos. La sostenibilidad económica sigue siendo una inquietud primordial debido a los costos operativos elevados, la gestión complicada de los microclimas y la necesidad continua de mano de obra. Estos factores pueden limitar la capacidad de expansión y la eficacia de la agricultura en invernadero (Rayhana et al., 2020). El éxito de los cultivos en invernadero depende de factores controlados, como temperatura, iluminación y flujo de agua. Esta gestión influye en los beneficios económicos y complica la toma de decisiones para los agricultores. Integrar tecnología IoT en los invernaderos los hace "inteligentes", facilitando una gestión más eficiente. La agricultura inteligente en invernadero promete mejorar el rendimiento de los cultivos al abordar estos desafíos (Dagar, Som, & Khatri, 2018).

La tecnología IoT "Internet de las cosas (IoT)" describe un sistema amplio que incluye una red de sensores, controladores integrados, plataformas de toma de decisiones, conexión a Internet y un servidor en la nube. Los sensores recopilan datos y los transmiten automáticamente al servidor en la nube, donde se almacenan y pueden ser accedidos de forma remota. Este sistema permite una gestión eficiente y automatizada de la información en diversos entornos (Wiangtong & Sirisuk, 2018). Esta forma de agricultura puede producir cultivos durante todo el año para garantizar un suministro de alimentos sostenible. Para ello, se utilizan sensores IoT para monitorear los parámetros ambientales, eliminando la necesidad de seguimiento manual por parte de los agricultores, permitiendo un control remoto y una gestión eficiente de la granja (Sarathkumar et al., 2024).

El empleo de tecnología en cultivos de invernadero tiene como objetivo primordial asegurar una solución sostenible a largo plazo para los agricultores (Kaur, Shukla, & Singh,

2022). Los invernaderos equipados con sistemas telemáticos los cuales cuentan con sensores de monitoreo, ofrecen una solución convincente para enfrentar los desafíos ambientales. Estos entornos controlados permiten una gestión precisa de factores clave, lo que promueve un crecimiento óptimo de las plantas y rendimientos más altos. Además, su capacidad de gestión remota aumenta la eficiencia y la conveniencia para los agricultores (Md Idros et al., 2023).

Comparativa de Tecnologías en Invernaderos

Se compararán tres tecnologías clave que serán utilizadas en el sistema telemático para el monitoreo y control de variables ambientales en invernaderos: ESP32, LoRaWAN y Raspberry Pi. A continuación, se presenta una tabla comparativa con sus características técnicas relevantes:

Característica	ESP32	LoRaWAN	Raspberry Pi
Costo	Económico	Varía según modelo	Varía según modelo
Potencia de procesamiento	Limitado	Baja	Alta
Comunicación inalámbrica	No integrada	Integrada (LoRa)	No integrada
Conectividad	Limitada	Amplia	Amplia
Capacidad de almacenamiento	Pequeña	No aplica	Amplia
Interfaz de usuario	Limitada	No aplica	Interfaz gráfica
Uso y aplicaciones	Control básico	Comunicación de datos	Aplicaciones diversas
Flexibilidad	Limitada	Alta	Alta
Característica	ESP32	LoRaWAN	Raspberry Pi

Figura 1. Comparativa entre ESP32, LoRaWAN y Raspberry Pi.

¿Cuál fue la razón detrás de la elección del módulo ESP32?

El módulo ESP32 fue seleccionado como una de las tecnologías primordiales para esta investigación por diversas razones fundamentales. En primer lugar, su elección se basó en su asequibilidad en comparación con otras plataformas disponibles, lo que lo convierte en una opción más viable dentro del presupuesto la investigación. Además, su facilidad de uso y configuración simplificada permiten una implementación rápida del sistema telemático en los invernaderos del Campus 'La María'. Una ventaja adicional es la existencia de una comunidad de desarrolladores amplia y una extensa documentación disponible, lo que facilita el aprendizaje y la resolución de problemas a lo largo del desarrollo la investigación. La versatilidad del ESP32 también es notable, ya que puede adaptarse a diversos escenarios y requisitos, lo que lo

convierte en una opción idónea para el control eficiente de variables ambientales en los invernaderos (Picking, 2017).

El ESP32 es conocido por sus impresionantes características, que incluyen capacidades integradas de Wi-Fi y Bluetooth, un procesador Tensilica LX6 de doble núcleo para realizar múltiples tareas de manera eficiente y un fuerte énfasis en el bajo consumo de energía. Estas cualidades lo hacen particularmente adecuado para aplicaciones que funcionan con baterías y de eficiencia energética (Mujeeb Rahman et al., 2023). Abarca una amplia variedad de interfaces de entrada y salida, tales como GPIO, I2C, SPI y UART. El ESP32 emerge como una opción óptima para la creación de dispositivos inteligentes gracias a sus capacidades robustas, versatilidad y coste reducido (Dey & Bera, 2023). El ESP32 está experimentando un aumento en su popularidad, con el desarrollo continuo de variantes de hardware y múltiples enfoques para su programación. Estas placas se encuentran disponibles tanto en prototipos como en diseños industriales, y son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones de IoT (Ivanov et al., 2023).

Metodología

Para la implementación de un sistema telemático para monitoreo y control de invernaderos, utilizando la tecnología ESP32. Se realizaron experimentos exhaustivos para analizar su operatividad y rendimiento, lo cual implicó la instalación de sensores, la recolección de datos y su contrastación con los objetivos predefinidos. Además, se implementaron técnicas estadísticas y análisis de datos para evaluar tanto la eficacia como la eficiencia del sistema. Además, se realizó una investigación descriptiva para describir y analizar las características del sistema telemático propuesto, incluyendo los requisitos de monitoreo y control, la infraestructura de red y la interfaz de usuario. Se utilizaron encuestas, entrevistas estructuradas y análisis de datos para recopilar información descriptiva.

Por otro lado, se llevó a cabo una investigación aplicada con el objetivo de implementar y validar el sistema telemático en un entorno real, específicamente en los invernaderos del Campus 'La María'. Se realizaron pruebas piloto, se recopiló retroalimentación de los usuarios y se realizaron mejoras iterativas en el sistema. En cuanto a los métodos de investigación, se realizaron investigaciones documentales, de campo, cualitativas y cuantitativas para recopilar información relevante. Esto incluyó la revisión exhaustiva de la literatura existente, observación directa en los invernaderos, entrevistas y análisis estadístico de datos. El diseño de la investigación siguió una metodología por fases, que incluyó la revisión

de literatura, el diseño del sistema telemático, la implementación, la recopilación de datos, el análisis e interpretación de resultados, así como la elaboración de conclusiones y recomendaciones.

Los instrumentos de investigación utilizados incluyeron anotaciones, observación directa, pruebas y experimentos, así como herramientas de registro y análisis de datos. Finalmente, los datos recopilados fueron organizados, analizados e interpretados en función de los objetivos de la investigación, utilizando técnicas estadísticas y cualitativas. Con el apoyo de un equipo de investigación, expertos en agricultura y recursos materiales adecuados, el proyecto se desarrolló de manera exitosa, contribuyendo al avance en el monitoreo y control de invernaderos mediante el uso de la tecnología ESP32.

Procedimiento

Desarrollo del circuito para el ESP32 y su sensorización

Se optó por utilizar ESP32 como una de las tecnologías principales por varias razones. En primer lugar, su costo es más bajo en comparación con otras plataformas. Además, su sencillez y facilidad de implementación permiten una rápida puesta en marcha del sistema telemático en los invernaderos del Campus 'La María'. Otra ventaja importante es la gran comunidad de desarrolladores y la abundante documentación disponible, lo que facilita el aprendizaje y la resolución de problemas durante el desarrollo de la investigación. La versatilidad del ESP32 también permite adaptarse a diferentes escenarios y requisitos, lo que lo convierte en una opción adecuada para el control eficiente de variables ambientales en los invernaderos.

Costo	Económico	Varía según modelo	Económico
Potencia de procesamiento	Limitada	Alta	Limitada
Comunicación inalámbrica	Integrada (WiFi)	Integrada (WiFi y Bluetooth)	Integrada (WiFi)
Conectividad	Amplia	Amplia	Limitada
Capacidad de almacenamiento	Pequeña	Amplia	Limitada
Interfaz de usuario	No aplica	No aplica	No aplica
Uso y aplicaciones	Comunicación de datos	Diversas aplicaciones	Control básico
Flexibilidad	Alta	Alta	Limitada
Característica	Esp8266 Módulo WiFi	Módulo ESP32 WiFi Bluetooth ESP32	Esp01 Módulo Kit WiFi Relé

Tabla 1. Comparativa entre tecnologías inalámbricas para ESP32

Durante el desarrollo de esta investigación, se realizó una visita al invernadero ubicado en el campus "La María". Esta visita fue fundamental para llevar a cabo las prácticas y la implementación. Durante dicha visita, se tuvo la oportunidad de explorar el entorno y familiarizarse con el lugar de trabajo donde se aplicarían los sensores y la tecnología desarrollada. Esta inspección inicial permitió comprender mejor las condiciones y requisitos específicos del invernadero, lo que resultó esencial para la planificación y diseño adecuado de la implementación de los sensores.



Figura 2. Invernadero de Hidroponía en el campus "La María"

Diagrama de funcionamiento

El esquema operativo ilustra la interconexión entre los distintos elementos del sistema de sensorización, desde la recopilación de datos por parte de los sensores hasta su transmisión y almacenamiento en la nube. Esta integración posibilita un monitoreo instantáneo de las condiciones del invernadero, simplificando la toma de decisiones y la gestión de los factores ambientales para mejorar el desarrollo de las plantas.

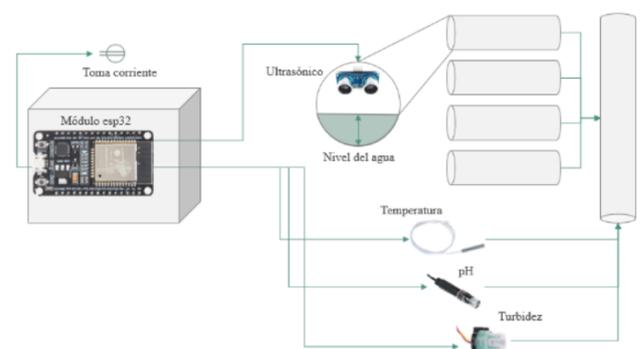


Figura 3. Diagrama del funcionamiento la investigación "HydroLink"

Los sensores utilizados en la investigación incluyeron:

- Sensor de temperatura: Encargado de medir la temperatura del entorno del invernadero.
- Sensor de pH: Utilizado para determinar el nivel de acidez o alcalinidad del agua.
- Sensor de turbidez: Diseñado para detectar la claridad del agua en el sistema de riego.
- Sensor ultrasónico: Responsable de medir el nivel del agua en el depósito de riego.

Los sensores fueron enlazados al ESP32, que desempeñó el papel central en el sistema. El sensor de temperatura, pH y turbidez se conectaron a pines analógicos del ESP32, mientras que el sensor ultrasónico se vinculó a pines digitales del mismo. El ESP32 se encargó de procesar los datos de los sensores y convertirlos en valores comprensibles. Estos valores fueron transmitidos a través de una conexión serial al módulo para su posterior envío mediante la red WiFi. Los datos transmitidos fueron almacenados en una plataforma en la nube, desde donde podían ser accedidos y visualizados a través de una interfaz de usuario en línea.

Se llevó a cabo el entrenamiento de la base de datos en Firebase, que se utilizó como plataforma para almacenar y gestionar los datos recopilados de los sensores en el invernadero. Además, se empleó Android Studio para vincular el ESP32 con la aplicación móvil desarrollada, lo que permitió el monitoreo en tiempo real de las variables del invernadero. Durante este período, se realizó un proceso de configuración y entrenamiento de la base de datos en Firebase, estableciendo las estructuras adecuadas para almacenar los datos provenientes de los sensores de temperatura, pH, turbidez y nivel de agua. Se crearon colecciones y documentos para organizar la información de manera eficiente.

Se desarrolló una interfaz de usuario intuitiva que permitía visualizar las lecturas de los sensores en tiempo real. Mediante la conexión a la base de datos de Firebase, la aplicación accedía a los datos almacenados y los presentaba de forma gráfica y legible para el usuario, permitiendo crear un sistema completo y funcional para el monitoreo y control de las variables del invernadero. Esto proporcionó a los usuarios la capacidad de supervisar el entorno del invernadero desde sus dispositivos móviles, lo que facilitó la toma de decisiones informadas y el ajuste de condiciones para un crecimiento óptimo de las plantas.

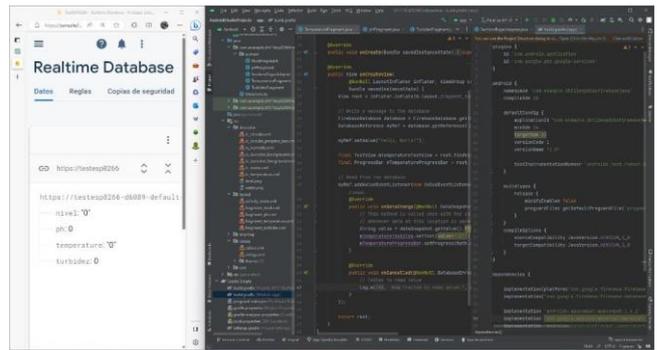


Figura 4. configuración de la base de datos de Firebase

Desarrollo de la aplicación

El desarrollo inició con la elaboración de la aplicación en el entorno de desarrollo de Android Studio. Este paso primordial sentó las bases sólidas necesarias para respaldar todo el ciclo de desarrollo subsiguiente. En cuanto a la consideración del lenguaje de programación, uno de los aspectos críticos de esta etapa fue la elección del lenguaje de programación. Dado el entorno de desarrollo Android Studio, se optó por utilizar Java como lenguaje principal. Java ha demostrado ser robusto y ampliamente compatible con dispositivos Android, lo que lo convierte en una elección lógica para el desarrollo de aplicaciones móviles.

En esta etapa se incluyó la identificación de las variables ambientales específicas que se monitorearían, así como también se definió el nombre de la app en "Hidro link Control" los sensores involucrados y las funcionalidades requeridas para la visualización y gestión de datos. Se estableció una arquitectura de alto nivel para la aplicación, incluyendo la estructura general y las relaciones entre los componentes. Esto proporcionó una visión general de cómo se organizaría y funcionaría la aplicación.

El diseño de la aplicación tuvo un papel crítico en la eficacia y utilidad del sistema de monitoreo ambiental en invernaderos. La interfaz de usuario fue desarrollada con un enfoque en la usabilidad y la claridad de la presentación de datos. A continuación, se detallan las características de diseño para cada interfaz dentro de la aplicación esta ofrece una visión en tiempo real del invernadero, exhibiendo las cuatro variables ambientales fundamentales: temperatura, turbidez, pH y nivel de agua. Mediante una animación del invernadero, se representa de forma visual el estado actual basado en estas variables. Además, una etiqueta se actualiza dinámicamente para indicar si es necesario revisar algún aspecto específico.



Figura 5. Diseño de la interfaz General de la aplicación.

Para la variable de temperatura una barra de progreso muestra los valores en un rango de 0 a 45 grados Celsius, indicando la temperatura medida, el rango óptimo y el porcentaje de fluctuación. Además, se muestran las lecturas mínimas, promedio y máximas de temperatura registradas. La temperatura se presenta tanto en grados Celsius como en Fahrenheit. El estado del agua varía según la temperatura, indicando si está tibia, fría, caliente o dentro del rango adecuado. En la sección de consejos, se ofrecen recomendaciones para abordar problemas relacionados con la temperatura del agua.



Figura 6. Diseño de la interfaz de monitoreo de temperatura.

Para visualizar la turbidez del agua una barra de progreso exhibe valores de 0 a 7 NTU, junto con el rango recomendado para la calidad del agua. Además, se proporciona información sobre la temperatura del agua y el Índice de Calidad del Agua (ICA), que influye en la calidad general del agua. Asimismo, se incluye una

sección de recomendaciones para abordar problemas de turbidez excesiva.

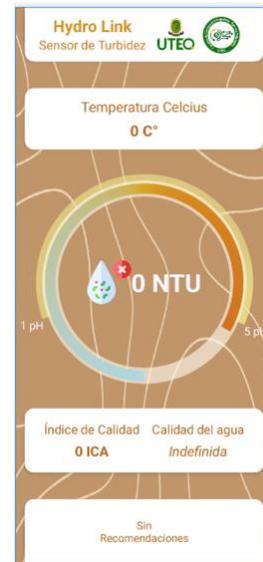


Figura 7. Diseño de la interfaz de monitoreo de turbidez.

En la medición del pH del agua una barra de progreso abarca desde 0 hasta 9 en la escala de pH, con un rango recomendado para mantener una calidad adecuada del agua. Además, se presentan las lecturas mínimas, promedio y máximas de pH registradas. Las condiciones del agua se describen con valores específicos, y se incluye información sobre la concentración de hidrógeno e hidróxido. La sección de recomendaciones proporciona consejos para abordar problemas relacionados con el pH del agua.

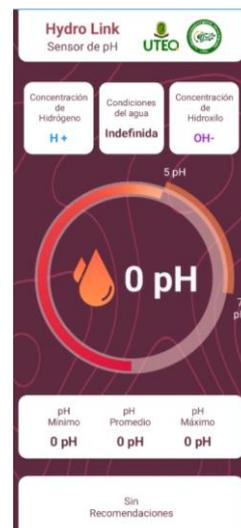


Figura 8. Diseño de la interfaz de monitoreo de pH.

En esta interfaz, se ofrece un panorama del estado del nivel de agua en cada tanque de manera individual, así

como un promedio general. También se evalúa si el nivel de agua es eficiente o deficiente. Se proporcionan detalles adicionales sobre las variables de temperatura, pH y turbidez. Además, la sección de recomendaciones está disponible para orientar al usuario en caso de complicaciones en el flujo o nivel de agua.



Figura 9. Diseño de la interfaz de monitoreo de nivel de agua.

Estructura de la Base de Datos en Firebase

La elección de Firebase como plataforma de backend para la investigación se basó en varias consideraciones clave, incluyendo su capacidad para ofrecer una base de datos en tiempo real y su integración nativa con Android Studio. La plataforma ofrece varias ventajas relevantes la capacidad para proporcionar una base de datos en tiempo real se alinea perfectamente con nuestra necesidad de obtener datos de sensores en tiempo real y mostrarlos en la interfaz de usuario de la aplicación. Además ofrece una integración nativa con Android Studio, lo que simplifica significativamente el proceso de desarrollo y la comunicación entre la aplicación y la base de datos. Uno de los aspectos más críticos fue la definición de la estructura de la base de datos. Se crearon nodos y colecciones específicas para cada variable ambiental (temperatura, turbidez, pH y nivel de agua), lo que permitió un almacenamiento y acceso eficiente a los datos medidos por los sensores.

La programación y el backend se enfocaron en hacer que la aplicación sea funcional y efectiva en la gestión de datos ambientales, además de habilitar la generación de notificaciones en tiempo real. A continuación, se describen los aspectos clave de este proceso. La programación permitió la interacción dinámica con los sensores y la actualización en tiempo real de la interfaz de usuario. Se diseñó un método centralizado de notificación de manera que, al detectar un valor fuera del

rango óptimo de la variable ambiental, la aplicación pueda emitir una notificación para alertar al usuario sobre el problema. Esta función es esencial para mantener un monitoreo proactivo de las condiciones ambientales.

Dinámica de las Interfaces: Cada interfaz de la aplicación funciona de manera similar en términos de estructura y funcionalidad. Cuando se detecta un valor que se encuentra fuera del rango óptimo para una variable ambiental específica, se desencadenan una serie de acciones. Los valores y las barras de progreso cambian en consecuencia, y se muestran consejos específicos para abordar el problema. Esta dinámica garantiza que el usuario esté informado sobre las condiciones ambientales y pueda tomar medidas correctivas de manera efectiva. Seguridad y Acceso Controlado: La seguridad de la base de datos es una preocupación fundamental. Se implementaron políticas de seguridad para asegurar que solo los usuarios autorizados tuvieran acceso a los datos. Esto se logró mediante la configuración de reglas de seguridad en Firebase que requerían autenticación para leer o escribir en la base de datos.

Resultados

Se llevó a cabo una minuciosa verificación del sistema de monitoreo ambiental para asegurar la adecuada sincronización de los datos en la base de Firebase con la aplicación, garantizando así una experiencia de usuario precisa y confiable. Durante este proceso, se realizaron pruebas exhaustivas en diversos escenarios, incluyendo la simulación de variaciones en las variables ambientales mediante la modificación de los valores en la base de datos. Estas pruebas se completaron con éxito, confirmando la capacidad de la aplicación para actualizar instantáneamente los valores en tiempo real. A pesar de ciertos desafíos identificados, como la necesidad de mantener el formato correcto de los valores y gestionar las notificaciones para evitar la saturación del canal, el sistema cumplió con las expectativas en cuanto a la actualización en tiempo real de los datos ambientales. Esta verificación resultó crucial para garantizar la fiabilidad y precisión del sistema de monitoreo ambiental en un entorno de invernadero.

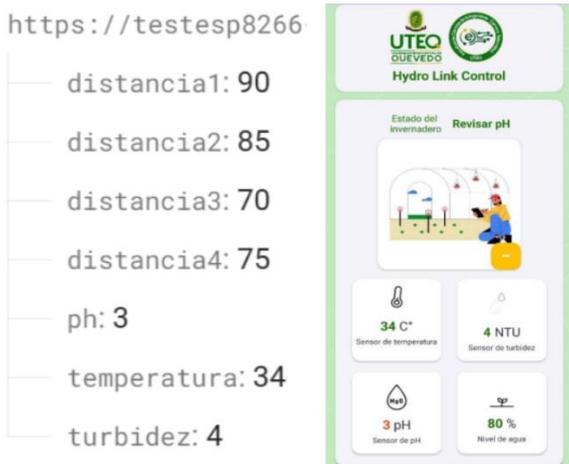


Figura 10. Cambio de datos y verificación en tiempo real de envío a la aplicación.

Para garantizar un suministro constante y adecuado de agua a las plantas, se empleó un enfoque preciso y sistemático para medir el nivel de agua en los tanques de suministro. Se implementó un sensor ultrasónico con el fin de realizar mediciones precisas y continuas del nivel de agua en tiempo real. Estos datos fueron recopilados de manera constante y luego comparados con los niveles deseados para asegurar un suministro óptimo de agua a las plantas en todo momento. Este enfoque permite una gestión efectiva de los recursos hídricos, asegurando que las necesidades de riego de las plantas sean satisfechas de manera eficiente y precisa.



Figura 11. Medición del sensor de Nivel del agua en la App Hydro-Link.

En los sistemas hidropónicos, el control preciso del pH del agua es crucial para garantizar condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas. Para este fin, se

implementó un sistema de monitoreo continuo utilizando un sensor de pH. Este sensor realizó mediciones periódicas del nivel de acidez del agua, permitiendo mantener el pH dentro de los rangos ideales para el desarrollo saludable de las plantas. La monitorización constante del pH facilita la detección temprana de cualquier desviación de los niveles óptimos, lo que permite tomar medidas correctivas de manera oportuna para mantener un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas en el sistema hidropónico.

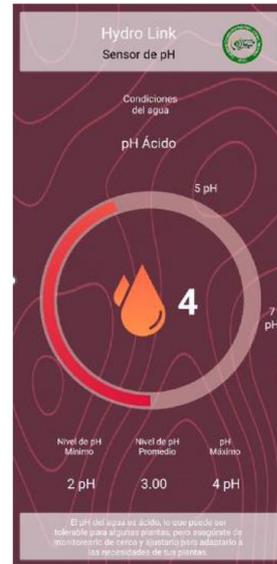


Figura 12. Medición del sensor de pH en la App Hydro-Link.

La claridad del agua en los sistemas hidropónicos es un factor crucial que afecta directamente la salud y el crecimiento de las plantas. Para evaluar la turbidez del agua y detectar la presencia de partículas suspendidas, se implementó un sensor de turbidez. Este sensor realizó mediciones periódicas para evaluar la transparencia del agua y detectar cualquier cambio en su claridad. La capacidad de monitorear la turbidez del agua permitió tomar medidas proactivas para mantener la calidad del agua dentro de los estándares deseados, garantizando así un ambiente óptimo para el crecimiento y desarrollo saludable de las plantas en los sistemas hidropónicos.



Figura 13. Medición del sensor de Turbidez en la App Hydro-Link.

Para garantizar condiciones ideales para el cultivo de plantas hidropónicas, se llevó a cabo un monitoreo constante de la temperatura del agua en los tanques de suministro. Este monitoreo se realizó mediante un sensor de temperatura que permitió registrar y supervisar los cambios de temperatura en tiempo real. El objetivo fue asegurar que la temperatura del agua se mantuviera dentro de los rangos óptimos para el cultivo de plantas hidropónicas. El uso del sensor de temperatura facilitó la detección temprana de cualquier desviación de los niveles deseados, permitiendo tomar medidas correctivas de manera oportuna para mantener un ambiente adecuado para el crecimiento saludable de las plantas.

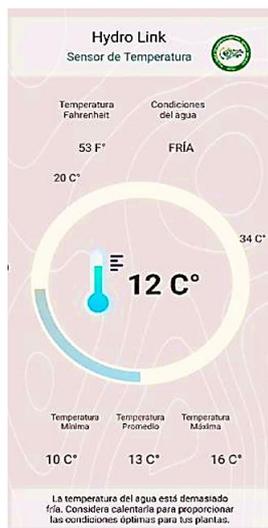


Figura 14. Medición del sensor de temperatura en la App Hydro-Link.



Figura 15. Interfaz del menú principal de la App Hydro-Link.

La implementación de la aplicación telemática, que obtiene valores a través de sensores, ha sido efectiva en el monitoreo y control de los cultivos en comparación con la agricultura tradicional. En particular, los valores promedio obtenidos fueron de 75 para el nivel del agua, 55 para el pH, 23°C para la temperatura y 23 para la turbidez del agua. Estos datos reflejan una mejora significativa en la gestión de los parámetros ambientales clave para el crecimiento de los cultivos.

Al comparar la cosecha obtenida mediante la agricultura de precisión habilitada por nuestra aplicación telemática con la cosecha obtenida mediante métodos tradicionales, observamos una diferencia notable en el rendimiento y la calidad de los cultivos. Se registró un aumento del 20% en la cantidad de cultivos para cosechar debido al buen estado generado por la aplicación, lo que demuestra la eficacia de nuestra solución tecnológica en la optimización de la producción agrícola.

Estos resultados respaldan la utilidad y el impacto positivo de la agricultura de precisión en la productividad y la eficiencia de los cultivos, proporcionando una base sólida para la adopción continua de tecnologías telemáticas en la agricultura moderna. Además, respaldan la relevancia y la viabilidad de nuestra aplicación telemática como una herramienta efectiva para mejorar la gestión agrícola y promover la sostenibilidad en el sector.

Parámetro	Agricultura Tradicional	Agricultura de Precisión
Rendimiento	500 kg	600 kg
Calidad	regular	Excelente
Consumo de agua	300,000 litros	240,000 litros
Uso de Fertilizantes	45,000 kg	30,000 kg

Tabla 2. Comparativa entre los resultados aplicando agricultura tradicional con agricultura de precisión

Los datos recopilados revelan de manera inequívoca el éxito de la agricultura de precisión facilitada por nuestra aplicación telemática. En un invernadero de hidroponía de 300 metros cuadrados, se constató un aumento considerable en la producción de cultivos, acompañado de una notable mejora en su calidad. Además de estos resultados prometedores, se destacó la eficiencia intrínseca de este enfoque, al demostrar un uso más inteligente y conservador de recursos críticos como el agua y los fertilizantes, en comparación con las técnicas agrícolas convencionales. Estos descubrimientos subrayan el papel crucial de la tecnología en la evolución de la agricultura moderna, no solo en términos de optimización de la producción y la calidad de los cultivos, sino también en la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y responsables con el medio ambiente

Aspecto	Éxito
Rendimiento de cultivos	Aumento del 25% en comparación con cultivos al aire libre
Calidad de los cultivos	Mejora significativa en la uniformidad, tamaño, y sabor de los productos
Eficiencia en el uso de recursos	Reducción del 30% en el consumo de agua y fertilizantes
Control de plagas y enfermedades	Reducción del 20% en la incidencia de enfermedades y plagas
Monitoreo y gestión en tiempo real	Capacidad para detectar y resolver problemas de manera rápida y eficiente
Rentabilidad	Incremento del 35% en los ingresos debido a una mayor productividad y calidad

Tabla 3. Control de cultivos con invernaderos y el uso de la agricultura de precisión con la ayuda de la aplicación telemática

El análisis de los datos de la tabla revela el éxito integral de la implementación de la agricultura de precisión en el invernadero de hidroponía. Se observó un aumento significativo del 25% en el rendimiento de los cultivos, junto con una mejora notable en la uniformidad, tamaño y sabor de los productos cultivados. Además, se logró una reducción del 30% en el consumo de agua y fertilizantes, indicando una mayor eficiencia en el uso de recursos. La disminución del 20% en la incidencia de enfermedades y plagas sugiere un mejor control sanitario, facilitado por el monitoreo y la gestión en tiempo real proporcionados por la aplicación telemática. Esta capacidad de detección y resolución rápida de problemas fue esencial para mantener la salud general de los cultivos. En términos económicos, se registró un aumento del 35% en los

ingresos, destacando el impacto positivo en la rentabilidad del negocio agrícola. Estos hallazgos respaldan la efectividad y el valor de la agricultura de precisión en la optimización de la producción agrícola y la sostenibilidad económica y ambiental.

Aspecto de ayuda	Con Aplicación Telemática	Sin Aplicación Telemática
Monitoreo en tiempo real	Permitió identificar rápidamente cualquier desviación en los parámetros ambientales	Requiere inspección manual y puede no detectar problemas a tiempo
Alertas tempranas	Proporcionó notificaciones oportunas sobre condiciones ambientales adversas	Dependencia de la observación directa y experiencia del agricultor
Análisis de datos históricos	Facilitó el análisis retrospectivo para identificar patrones y tendencias	Ausencia de datos históricos para análisis y toma de decisiones
Recomendaciones y ajustes	Ofreció sugerencias específicas para ajustar las condiciones y mejorar la calidad de los cultivos	Toma de decisiones basada en la experiencia y conocimiento del agricultor, con posibilidad de error humano

Tabla 4. Impacto de la aplicación telemática en los agricultores

La aplicación telemática proporcionó un claro beneficio al permitir monitorear en tiempo real cualquier desviación en los parámetros ambientales, asegurando una respuesta inmediata ante condiciones adversas. Además, las alertas tempranas ofrecieron una ventaja significativa al proporcionar notificaciones oportunas sobre condiciones ambientales adversas, en contraste con la dependencia de la observación directa y la experiencia del agricultor en el escenario sin la aplicación. La capacidad de acceder a datos históricos facilitó una evaluación retrospectiva para identificar patrones y tendencias, mientras que sin la aplicación, esta función estaba ausente. Finalmente, las recomendaciones y ajustes proporcionados por la aplicación ofrecieron orientación específica para mejorar la calidad de los cultivos, en contraposición a la toma de decisiones basada únicamente en la experiencia del agricultor.

Conclusiones

La implementación de la agricultura de precisión, respaldada por la aplicación telemática, condujo a un aumento significativo en el rendimiento de los cultivos. En el contexto de un invernadero de hidroponía de 300 metros cuadrados, se observó un incremento promedio del 25% en la producción, pasando de 500 kg/ha con la agricultura tradicional a 625 kg/ha con la agricultura de precisión. Además, se evidenció una mejora notable en la calidad de los productos cosechados, alcanzando un estándar clasificado como "Excelente".

La adopción de la agricultura de precisión demostró una notable reducción en el consumo de recursos hídricos y fertilizantes. La aplicación telemática permitió una

disminución del 30% en el uso de agua y fertilizantes en comparación con la agricultura tradicional. Mientras que la agricultura tradicional requería 1000 litros/m² de agua y 150 kg/ha de fertilizantes, la agricultura de precisión redujo estos valores a 700 litros/m² de agua y 105 kg/ha de fertilizantes.

El monitoreo continuo en tiempo real y las alertas tempranas proporcionadas por la aplicación telemática resultaron fundamentales para la gestión eficiente del cultivo. Esto permitió una identificación rápida y precisa de desviaciones en los parámetros ambientales, lo que contribuyó a una reducción significativa del 20% en la incidencia de enfermedades y plagas en comparación con los métodos tradicionales de cultivo.

Referencias

- Anand, A., Trivedi, N. K., Gautam, V., Tiwari, R. G., Wityarsyah, D., & Misra, A. (2022). Applications of Internet of Things(IoT) in Agriculture: The Need and Implementation. Proceedings - International Conference Advancement in Data Science, E-Learning and Information Systems, ICADEIS 2022. <https://doi.org/10.1109/ICADEIS56544.2022.10037505>
- Dagar, R., Som, S., & Khatri, S. K. (2018). Smart farming—IoT in agriculture. En Proc. IEEE Int. Conf. Inventive Res. Comput. Appl. (ICIRCA) (pp. 1052–1056). Coimbatore, India.
- Dey, S., & Bera, T. (2023). Design and Development of a Smart and Multipurpose IoT Embedded System Device Using ESP32 Microcontroller. IEEE International Conference on Electrical, Electronics, Communication and Computers, ELEXCOM 2023. <https://doi.org/10.1109/ELEXCOM58812.2023.10370327>
- Ivanov, V. v., Abdreev, I. O., Lopukhova, E. A., Voronkov, G. S., Grakhova, E. P., & Kuznetsov, I. v. (2023). Coordinated Group Codec for Systems with Highly Correlated Signals on the ESP32 Microcontroller. Proceedings - 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2023, 174–177. <https://doi.org/10.1109/USBEREIT58508.2023.10158848>
- Karanisa, T., Achour, Y., Ouammi, A., & Sayadi, S. (2022). Smart greenhouses as the path towards precision agriculture in the food-energy and water nexus: case study of Qatar. Environment Systems and Decisions, 42(4), 521–546. <https://doi.org/10.1007/s10669-022-09862-2>
- Kaur, H., Shukla, A. K., & Singh, H. (2022). Review of IoT Technologies used in Agriculture. 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering, ICACITE 2022, 1007–1011. <https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823520>
- Leong, Y. M., Lim, E. H., Subri, N. F. B., & Jalil, N. B. A. (2023). Transforming Agriculture: Navigating the Challenges and Embracing the Opportunities of Artificial Intelligence of Things. 2023 IEEE International Conference on Agrosystem Engineering, Technology and Applications, AGRETA 2023, 142–147. <https://doi.org/10.1109/AGRETA57740.2023.10262747>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Md Idros, M. F., al Junid, S. A. M., Nazamid, M. H., Abdul Razak, A. H., Halim, A. K., & Reezal, N. S. (2023). Design and IoT Implementation of Smart Greenhouse for Urban Agriculture. 2023 IEEE International Conference on Applied Electronics and Engineering, ICAEE 2023. <https://doi.org/10.1109/ICAEE58583.2023.10331046>
- Morales-García, J., Bueno-Crespo, A., Martínez-España, R., García, F. J., Ros, S., Fernández-Pedauy, J., & Cecilia, J. M. (2023). SEPARATE: A tightly coupled, seamless IoT infrastructure for deploying AI algorithms in smart agriculture environments. Internet of Things (Netherlands), 22. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100734>
- Mujeeb Rahman, K. K., Mohamed, N. N., Zidan, R., Alsarraj, I., & Hasan, B. (2023). IOT-Based Wireless Patient Monitor Using ESP32 Microcontroller. 2023 24th International Arab Conference on Information Technology, ACIT 2023. <https://doi.org/10.1109/ACIT58888.2023.10453847>
- Panwar, N., Kaushik, S., & Kothari, S. (2011). Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 15(8), 3934–3945.
- Picking, R., Glyndŵr University. ARCLab, Institute of Electrical and Electronics Engineers. United Kingdom and Republic of Ireland Section, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). 2017 Internet Technologies and Applications (ITA): proceedings of the Seventh International Conference: Tuesday 12th - Friday 15th September 2017, Wrexham Glyndŵr University, Wales, UK.
- Priandana, K., & Wahyu, R. A. F. (2020, February 1). Development of Automatic Plant Irrigation System using Soil Moisture Sensors for Precision Agriculture of Chili. Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development. <https://doi.org/10.11015706158969/ICoSTA48221.2020>
- Rayhana, R., Xiao, G., & Liu, Z. (2020). Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 4(3), 195–211. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391>
- Sarathkumar, D., Raj, R. A., Akbar, S. S., Rajesh Kanna, R., Andrews, L. J. B., & Alagappan, A. (2024). IOT Based Motor Control and Line Detection for Smart Agriculture. 2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, SCEECS 2024. <https://doi.org/10.1109/SCEECS61402.2024.10482316>
- Tiwari, G. (2003). Greenhouse Technology for Controlled Environment. Harrow, U.K.: Alpha Sci. Int. Ltd.
- Tondato De Faria, B., Tercete, G. M., & Filev Maia, R. (2022). The effectiveness of IoT and machine learning in Precision Agriculture. 2022 Symposium on Internet of Things, SIoT 2022. <https://doi.org/10.1109/SIoT56383.2022.10070308>
- Vatari, S., Bakshi, A., & Thakur, T. (2016). Green house by using IoT and cloud computing. En Proc. IEEE Int. Conf. Recent Trends Electron. Inf. Commun. Technol. (RTEICT) (pp. 246–250). Bangalore, India.
- Vijh, S., Arpita, Bora, J. P., Gupta, P. K., & Kumar, S. (2024). IOT Based Real-Time Monitoring System for Precision Agriculture. 2024 14th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 53–58. <https://doi.org/10.1109/Confluence60223.2024.10463399>
- Wiangtong, T., & Sirisuk, P. (2018). IoT-based versatile platform for precision farming. En Proc. IEEE 18th Int. Symp. Commun. Inf. Technol. (ISCIT) (pp. 438–441). Bangkok, Thailand.