

Artículo original

**Desarrollo de una estación IoT para
monitoreo de microclimas y condiciones de
suelo para adaptación de cultivos al
cambio climático**

Development of an IoT station for monitoring
microclimates and soil conditions to adapt crops to
climate change

WILLIAM EDUARDO SALGADO VILLANUEVA¹
 <https://orcid.org/0000-0002-1964-0230>

GUIDO EDSON DIEGO BACIGALUPO CHOCANO²
 <https://orcid.org/0009-0003-3876-4428>

FERNANDO JOSÉ ACOSTUPA GODOY³
 <https://orcid.org/0009-0001-5319-7965>

TITO LEONCIO CÓRDOVA MIRANDA⁴
 <https://orcid.org/0000-0001-5060-0221>

HUGO JAVIER RIVERA HERRERA⁵
 <https://orcid.org/0000-0002-9896-5008>

Recibido: 06/02/2025
Aceptado: 01/04/2025
Publicado: 15/04/2025

^{1,2,3,4,5}Círculo de Investigación IoT Electrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

E-mail: ¹wilsalgado@upt.pe, ²guibacigalupoc@upt.pe, ³feracostupag@upt.pe,
⁴tilcordova@upt.pe, ⁵hujrivera@upt.pe



Resumen

El cambio climático afecta directamente a los cultivos a nivel mundial, representando una amenaza creciente para la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Este estudio tuvo como objetivo diseñar una estación basada en Internet de las Cosas (IoT) para monitorear microclimas y condiciones del suelo. Se implementó un sistema compuesto por nodos centrales (ESP32 LILYGO T-SIM7000G con el módulo RF nRF24L01) y nodos secundarios (NodeMCU-32, basado en el microcontrolador ESP32), equipados con sensores para medir variables ambientales y del suelo, como humedad, temperatura, presión, radiación UV, velocidad del viento, así como conductividad, nitrógeno, fósforo y potasio. Los dispositivos utilizados incluyeron un pluviómetro digital MS-WH-SP-RG, un sensor BME 280, un sensor de suelo NPK JXBS-3001-NPK-RS, un sensor UV CJMCU-GUVA-S12SD, un anemómetro JL-FS2 y una veleta B08N52YR8Z. Los datos recolectados fueron transmitidos a través de la plataforma en la nube ThingSpeak y se desarrolló una interfaz web para su visualización. Los resultados indicaron que el sistema IoT recopiló datos con alta precisión y fiabilidad, mostrando una concordancia significativa con los datos de un equipo profesional de referencia. La integración de tecnologías IoT en la agricultura ofrece soluciones efectivas para enfrentar los desafíos del cambio climático, mejorando la capacidad de adaptación y la eficiencia en la gestión de cultivos.

Palabras clave: adaptación de cultivos; cambio climático; estación meteorológica; IoT; sensores.

Abstract

Climate change directly affects crops worldwide, posing an increasing threat to agricultural production and food security. The aim of this study was to design an Internet of Things (IoT) station to monitor microclimates and soil conditions. A system was implemented consisting of central nodes (ESP32 LILYGO T-SIM7000G with the RF module nRF24L01) and secondary nodes (NodeMCU-32, based on the ESP32 microcontroller), equipped with sensors to measure environmental and soil variables such as humidity, temperature, pressure, UV radiation, wind speed, as well as conductivity, nitrogen, phosphorus, and potassium. The devices used included a digital rain gauge MS-WH-SP-RG, a BME 280 sensor, an NPK soil sensor JXBS-3001-NPK-RS, a UV sensor CJMCU-GUVA-S12SD, an anemometer JL-FS2, and a weather vane B08N52YR8Z. The collected data was transmitted via the cloud platform ThingSpeak, and a web interface was developed for visualization. The results indicated that the IoT system collected data with high accuracy and reliability, showing significant agreement with data from a professional reference device. The integration of IoT technologies in agriculture provides effective solutions to address the challenges of climate change, improving adaptation capacity and efficiency in crop management.

Keywords: crop adaptation; climate change; weather station; IoT; sensors.



1. Introducción

El cambio climático es una realidad que afecta directamente la producción de alimentos, lo que representa un desafío para satisfacer las necesidades de una población mundial en constante crecimiento. Se espera que para 2050 la población supere los 9700 millones, aumentando la presión sobre los recursos agrícolas, que disminuyen debido a la urbanización (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2019). A esto se suma la creciente demanda de alimentos de mayor calidad nutricional debido al aumento de la clase media. Sin embargo, el cambio climático, manifestado en temperaturas más altas, sequías y fenómenos extremos, está impactando negativamente en la productividad y calidad de los cultivos básicos en todas las regiones. Además, los sistemas alimentarios, incluyendo la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, se ven afectados por eventos climáticos extremos. Esto resulta en una mayor vulnerabilidad a la inseguridad alimentaria y nutricional, especialmente en las comunidades rurales (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015). Además, las tensiones bióticas exacerbadas por el cambio climático, como las plagas y enfermedades, también afectan la producción de alimentos (Kumar et al., 2022).

Dado que las zonas agrícolas requieren supervisión y gestión constantes, estas son candidatas ideales para la implementación de sistemas de Internet de las Cosas (IoT). Paradigmas como la computación en la nube, redes de sensores inalámbricos (WSN), actuadores, sistemas de geoposicionamiento, Big Data, aprendizaje automático, drones y robótica tienen un gran potencial para mejorar la productividad agrícola (Čolaković & Hadžialić, 2018). El IoT puede ser utilizado en toda la cadena de producción agrícola para evaluar el estado de los cultivos, monitorear plagas y enfermedades, medir parámetros meteorológicos como temperatura y humedad, y evaluar variables de campo como el estado del suelo. Además, puede enviar mensajes de recomendación o activar alertas (Muangprathub et al., 2019).

La vulnerabilidad de Perú a las variaciones climáticas es evidente por los daños económicos provocados por fenómenos como El Niño. En un escenario pasivo, los efectos del cambio climático podrían ser aún más severos, afectando la biodiversidad, la salud humana, la productividad agrícola y pesquera, y los recursos hídricos (Sánchez, 2016). En comparación con otras naciones de América Latina y del mundo, la producción agrícola en Perú es limitada en comparación con otras naciones de América Latina y del mundo, debido a numerosas restricciones y deficiencias del sector. Aumentar el grado de supervisión y gestión de los factores de producción de cultivos agrícolas es una estrategia clave para apoyar el crecimiento competitivo del sector (Aguilar, 2020). Entre las diversas tecnologías de información y comunicación disponibles, el microcontrolador ESP32 permite el diseño de sistemas de riego habilitados para IoT que automatizan el proceso de riego mediante la recopilación de datos, activación y desactivación del riego automático, y comunicación con aplicaciones móviles (Pereira et al., 2023). La incorporación de redes inalámbricas de sensores (WSN) en la agricultura ha demostrado ser efectiva, permitiendo enfoques novedosos y organizados para aumentar el rendimiento de los cultivos mediante el monitoreo de la composición de macronutrientes de las plantas y la migración de cultivos en respuesta al cambio climático (Musa et al., 2023).

La agricultura es un componente esencial del crecimiento económico de nuestra nación. Los principales determinantes de la producción agrícola son la fertilidad y el contenido de humedad del suelo. Las recomendaciones sobre fertilización se basan en los nutrientes

presentes en el suelo, obtenidos tras un análisis que generalmente se realiza en un laboratorio. Sin embargo, medir manualmente los nutrientes del suelo es un proceso que lleva mucho tiempo. Como resultado, muchos agricultores no analizan su suelo en un laboratorio y continúan cultivando lo mismo durante todo el año, lo que reduce la fertilidad del suelo. Para abordar este problema, se ha desarrollado un sistema que utiliza redes de sensores inalámbricos para aplicar la agricultura de precisión, permitiendo el control remoto de la fertilidad del suelo y otros parámetros como la temperatura, el pH y el contenido de humedad del suelo. Esta solución de software basada en IoT es lo suficientemente inteligente como para sugerir la cantidad adecuada de agua y fertilizante necesarios para mejorar la calidad del suelo y garantizar el mejor desarrollo posible de los cultivos.

Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue diseñar una estación IoT para monitorear microclimas y condiciones del suelo, con el fin de mejorar la adaptación de cultivos frente al cambio climático.

2. Metodología

2.1. Lugar de estudio

El área de estudio estuvo constituida por la zona de del distrito de Pachía, ubicada en la ciudad de Tacna, con coordenadas de Latitud - 17°53'31.5"S y Longitud 70°09'01.5"W. En la ruta que une la provincia de Tacna con el distrito de Pachía, se contó con cobertura 4G de un operador nacional. En la Figura 1, se visualizan el mapa de la ubicación geográfica y la ubicación del nodo central y el nodo secundario, respectivamente.

Figura 1

Ubicación geográfica del diseño y de los nodos

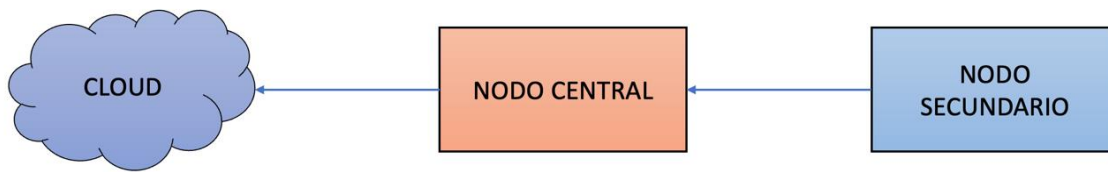


2.2. Arquitectura del sistema

El sistema se compuso de un nodo central y un nodo secundario, como se describe en la Figura 2. El microcontrolador del nodo secundario se comunicó con el microcontrolador del nodo central para recibir los datos de los sensores. El nivel físico, el nivel de red y el nivel de aplicación de los sistemas del Internet de las Cosas (IoT) constituyeron la base de la arquitectura del sistema.



Figura 2

Arquitectura del sistema

El nivel físico estuvo formado por sensores que permitieron recoger datos pertinentes para el seguimiento de las condiciones ambientales, como la medición de la humedad y la temperatura ambiente, el nivel de humedad y macronutrientes del suelo, la intensidad de las precipitaciones y el nivel de radiación solar.

El nivel de red hizo posible conectar dispositivos inteligentes a servidores u otros dispositivos inteligentes. El protocolo de comunicación RF facilitó la comunicación entre el nodo central y el nodo secundario. El nodo central utilizó el protocolo GPRS para conectarse a la base de datos alojada en la nube. Una vez que el nodo central recibió los datos, los presentó al usuario a través de una interfaz a nivel de aplicación para su supervisión.

2.3. Implementación del sistema

a. Diseño de hardware

El sensor del nodo secundario recogió información sobre las condiciones ambientales y del suelo, enviándola al nodo central. Todos los datos fueron recibidos por el nodo central, que los evaluó y formateó para almacenarlos en su registro diario. Para permitir el seguimiento de las condiciones ambientales y del suelo, el nodo central transmitió simultáneamente los datos obtenidos a una base de datos IoT situada en la nube.

Los dispositivos empleados se presentan simultáneamente en la Tabla 1. El sensor de humedad, temperatura y presión constó de una Placa de Circuito Impreso (PCB) de temperatura, humedad y presión BME280, que contenía un sensor Bosch BME280 y componentes electrónicos adicionales montados en una sola PCB. El sensor BME280 utilizó un protocolo de comunicación I2C de dos cables para comunicarse con el microcontrolador; el microcontrolador envió comandos al sensor para medir los tres parámetros meteorológicos y luego tomó las lecturas del sensor (Fisher, et al., 2018; Đorđević et al., 2020). Por otro lado, para medir la humedad del suelo se utilizó el sensor NPK JXBS-3001-NPK-RS, que permitió medir la fertilidad del suelo, así como otros parámetros como la temperatura, el pH, y macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, además del contenido de humedad del suelo (Cheruvu et al., 2023).

Además, los sensores UV CJMCU-GUVA-S12SD fueron fundamentales en la detección y medición de la radiación ultravioleta. Su capacidad para evaluar la intensidad de la radiación UV es esencial para comprender los efectos potenciales en la salud humana, así como para evaluar su impacto en el medio ambiente. Esto se debe a que los sensores UV pueden detectar la luz ultravioleta, y el efecto de las nubes puede aumentar la radiación UV cuando está nublado (Jamroen et al., 2021). Para el estudio de la vigilancia de las precipitaciones se utilizó un

pluviómetro digital, cuya función fue medir la cantidad de precipitación caída en un periodo determinado.

Tabla 1
Distribución de dispositivos en cada nodo








Dispositivo	Modelo		Nodo central	Nodo secundario
Sensor de suelo	JXBS-3001-NPK-RS		X	√
Sensor de intensidad de lluvia	MS-WH-SP-RG		√	X
Sensor de velocidad de viento	JL-FS2		√	X
Sensor de dirección de viento	B08N52YR8Z		√	X
Sensor de radiación UV	CJMCU-GUVA-S12SD		√	X
Sensor de humedad, temperatura y presión	BME280		√	X
Tarjeta de desarrollo /Microcontrolador	NodeMCU ESP32		X	√



Tabla 1 (Continuación)

Módulo de comunicación GPRS	LILYGO T-SIM7000G		✓	X
Módulo de comunicación inalámbrica	nRF24L01		✓	✓
Módulo de alimentación de energía	Adaptador de voltaje/ Panel solar mini/ Batería de Litio		✓	✓

Por otra parte, para medir la velocidad del viento se utilizó el anemómetro MS-WH-SP-RG (Almada, 2020), mientras que una veleta JL-FS2, dispositivo colocado sobre un eje vertical que gira libremente para moverse a medida que el viento cambia de dirección, se utilizó para medir la dirección del viento. Normalmente, el movimiento de la veleta se amortigua para evitar cambios bruscos en la dirección del viento (Almarcha, 2023).

En cuanto a la tarjeta de desarrollo y microcontrolador, para el diseño de la estación se utilizó el microcontrolador NodeMCU ESP32, fabricado por Espressif Systems. Este microcontrolador es muy flexible y combina funciones Bluetooth y Wi-Fi en un solo chip. Gracias a su adaptabilidad y bajo consumo, es perfecto para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT), lo que permite a los desarrolladores crear una amplia gama de dispositivos conectados y soluciones creativas. También se utilizó el módulo LILYGO T-SIM7000G, perfecto para aplicaciones de IoT que requieren conectividad celular, ya que combina un microcontrolador de la familia ESP32 con una SIM7000G contemporánea para la conexión a redes celulares, permitiendo la comunicación a través de GSM (2 G), GPRS (2,5 G) y NB-IoT (Narrowband IoT) (Petracci et al., 2024).

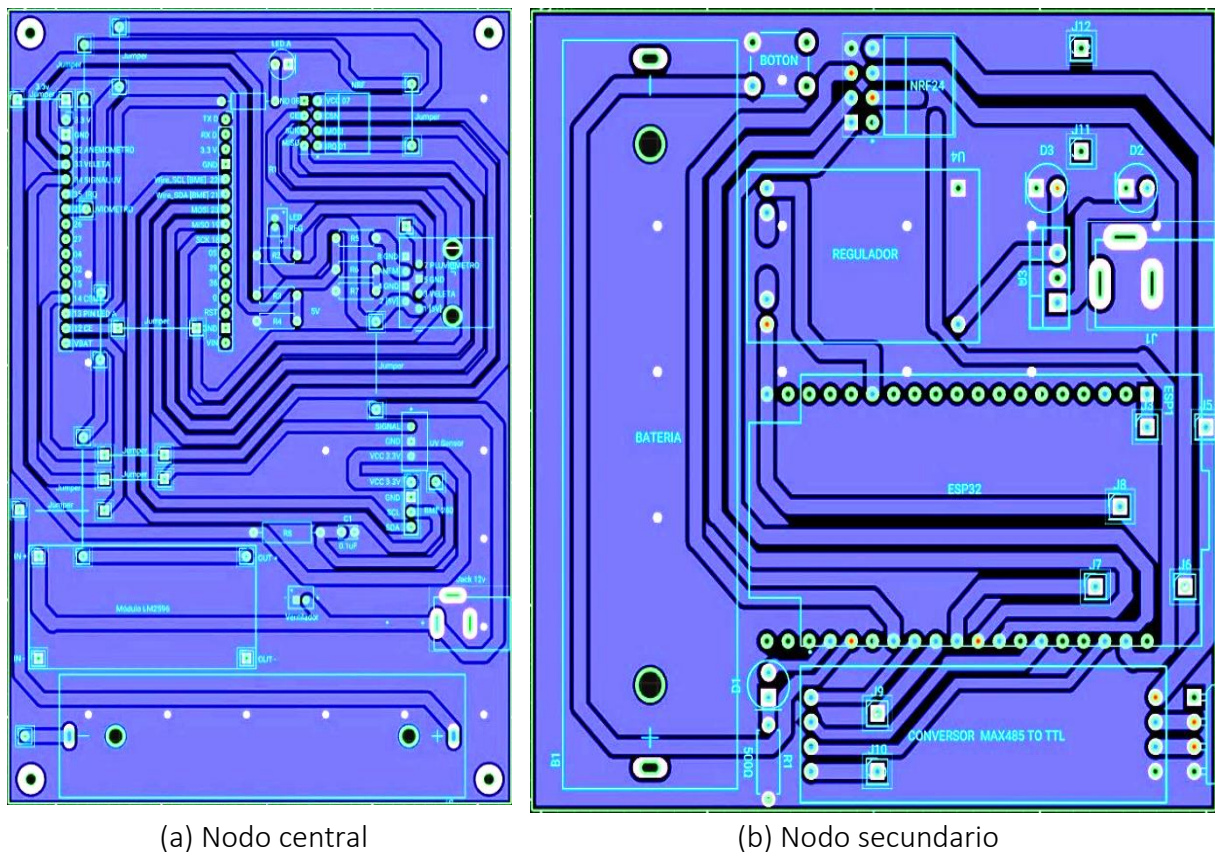
En términos de comunicación inalámbrica, un módulo RF nRF24L01, que opera en la banda de frecuencia de 2,4 GHz, fue encargado de enviar y recibir datos de los nodos sensores a través del medio de radiofrecuencia. El objetivo principal de este módulo de radiofrecuencia, que contiene un amplificador de RF integrado y una antena externa, fue permitir la

comunicación inalámbrica entre dispositivos electrónicos como microcontroladores, Arduino, Raspberry Pi y otros sistemas integrados (Flores et al., 2015).

Por último, en cuanto al módulo de alimentación de energía, un adaptador de voltaje de 12 voltios transformó la corriente eléctrica de una toma convencional (a menudo de 120 o 220 voltios) en una corriente de salida de 12 voltios, que puede alimentar una gran variedad de dispositivos electrónicos. A pesar de su sencillo diseño, el adaptador de voltaje de 12 V sirve de enlace entre el potencial eléctrico y el rendimiento preciso. Utilizando la tecnología de iones de litio, la batería de iones de litio de 3,7 voltios es una fuente de energía recargable que puede almacenar energía y alimentar una serie de aparatos electrónicos. Los paneles solares modestos son dispositivos ligeros que utilizan la radiación solar para producir cantidades modestas de energía, perfectos para aplicaciones que requieren poca energía o portabilidad.

Para el diseño del modelo de la placa de circuito, se utilizó FLUX.AI, un software basado en Internet. En la Figura 3a se muestra el diseño de la placa impresa para el nodo central, mientras que en la Figura 3b se presenta el diseño correspondiente al nodo secundario.

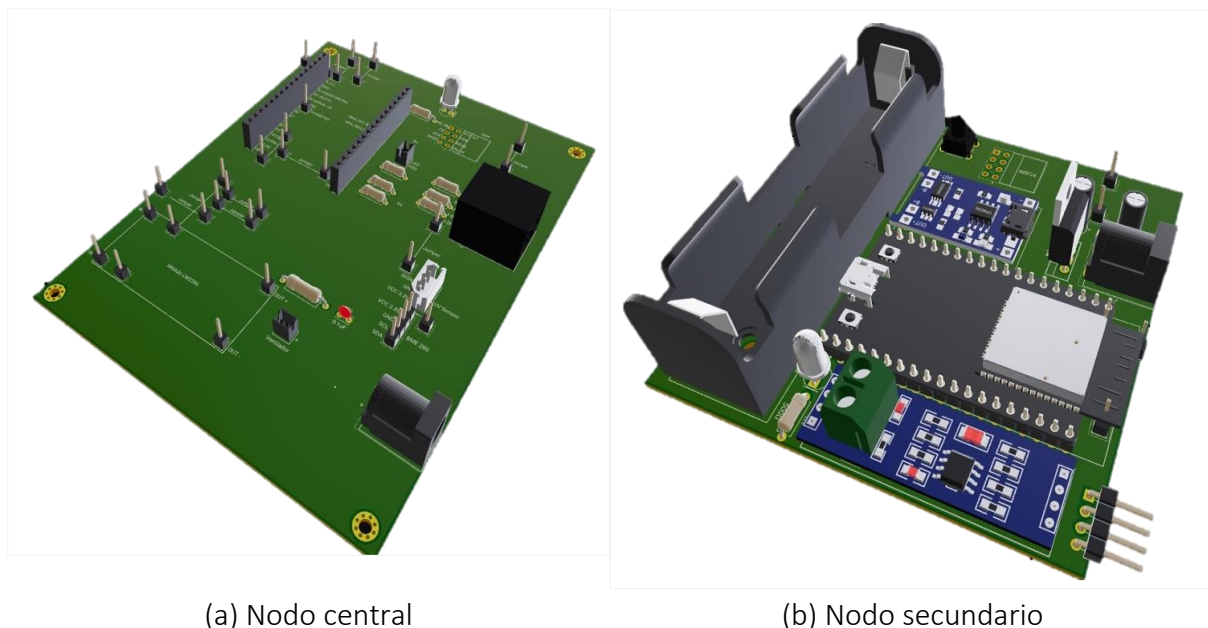
Figura 3
Modelo de placa impresa



La ventaja ofrecida por el programa FLUX.AI fue la capacidad de proporcionar una vista en 3D de cómo quedaría el diseño de la placa impresa. En la Figura 4a, se visualiza la placa en formato 3D correspondiente al nodo central, mientras que en la Figura 4b, se muestra la placa en formato 3D del nodo secundario.



Figura 4
Vista 3D de la placa



(a) Nodo central

(b) Nodo secundario

b. Diseño de software

La programación se llevó a cabo en el entorno de desarrollo integrado (IDE) Arduino. Para el nodo central, se implementó el algoritmo descrito en la Tabla 2.

Tabla 2
Algoritmo representativo del nodo central

Nodo central	
Paso 1.	Declara librerías
Paso 2.	Declara variables
Paso 3.	Configura transmisión/recepción
<i>Inicio bucle</i>	
Paso 4.	Recepción de la señal RF
Paso 5.	Recibe los datos del sensor provenientes del nodo secundario
Paso 6.	Selecciona los datos del nodo de donde proviene
Paso 7.	Muestra los datos en el monitor serial
Paso 8.	Se actualiza los datos recibidos del sensor
Paso 9.	Publica datos en la nube para su monitoreo por el usuario de forma remota
Paso 10.	Se crea un formato XLXS para almacenar los datos registrados en el día
<i>Fin bucle</i>	

El nodo secundario opera de manera similar, por lo que se siguió el mismo algoritmo, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3
Algoritmo representativo del nodo secundario

Nodo secundario	
Paso 1.	Declara librerías
Paso 2.	Declara variables
<i>Inicio bucle</i>	
Paso 3.	Recibe datos de los sensores
Paso 4.	Realiza el procesamiento de datos
Paso 5.	Modulación y transmisión de la señal RF
Paso 6.	Se transforma en paquetes de datos
Paso 7.	Se envían los datos al nodo central
Paso 8.	Registra los datos provenientes de los sensores
Paso 9.	Se guarda los datos a la nube
<i>Fin bucle</i>	

Tabla 4
Distribución de la programación realizada en Visual Studio Code

Aspecto	Descripción
Estación meteorológica	Configuración y uso de una estación meteorológica que proporciona datos en tiempo real. Utilización de un servicio web (en este caso, ThingSpeak) para acceder a los datos de la estación meteorológica a través de su API.
React components	Creación de componentes de React para visualizar información específica de la estación meteorológica, como la dirección del viento, la última fecha de actualización, y gráficas de datos meteorológicos.
Visualización de datos	Implementación de gráficas de datos meteorológicos utilizando bibliotecas de visualización como Nivo para representar de manera efectiva la información sobre temperatura, humedad, velocidad del viento, etc.
Mapa de Google	Integración de un mapa de Google en el dashboard para mostrar la ubicación de nodos o estaciones meteorológicas.
Dashboard	Configuración de un dashboard que muestra de manera organizada y estilizada la información recopilada de la estación meteorológica.
Styling y diseño	Utilización de MUI (Material-UI) para el diseño y estilización de componentes, gráficos y el dashboard en general.
Modo oscuro/Modo claro	Implementación de un sistema de cambio de modo entre oscuro y claro para mejorar la experiencia del usuario.
Configuración de rutas en react	Uso de React Router para gestionar las rutas de la aplicación y navegar entre diferentes secciones o páginas.
Estado y efectos en react	Utilización de estados y efectos en React para gestionar el flujo de datos, actualizar la interfaz de usuario y realizar llamadas a la API.
Resolución de problemas	Abordamos varios problemas comunes durante el desarrollo, como errores de sintaxis, manejo de errores en las llamadas a la API, y ajustes en la disposición de los elementos en el dashboard.



Por último, se desarrolló una interfaz web para visualizar el monitoreo de los sensores de manera más analítica y accesible. Esto implicó la elaboración de varios códigos en diferentes lenguajes de programación, como HTML, Python, CSS y JSON, utilizando el software Visual Studio Code. Estos códigos permitieron que los datos presentados en ThingSpeak se reflejaran en una página web. En la Tabla 4 se resume los diversos aspectos involucrados en la programación realizada en Visual Studio Code para configurar la estación meteorológica y las diferentes funcionalidades implementadas.

c. Montaje de los nodos IoT

Los módulos de control, de comunicación y de alimentación, fueron colocados y ensamblados juntos en un recipiente de almacenamiento fabricado en polímero termoplástico, para evitar alguna alteración de los mismos por condiciones del ambiente. Mientras que los sensores correspondientes de cada nodo fueron conectados mediante cables extensores al módulo de control, a excepción del sensor de radiación UV, que también requirió un recipiente de almacenamiento fabricado en polímero termoplástico.

d. Pruebas de campo

El nodo principal fue instalado a las afueras de la edificación principal de la chacra donde se realizaron las pruebas, contando con acceso a la red eléctrica de la misma pero ubicada en el exterior para captar los datos del ambiente; el nodo secundario fue instalado en medio de uno de los campos de cultivo para poder obtener datos del campo. Ambos nodos fueron instalados con una estructura de apoyo para sostener los sensores, controladores y fuente de alimentación de los nodos tal como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Instalación y montaje in situ



3. Resultados

Después de instalarlos se realizaron pruebas por un periodo de 4 horas, durante el cual se recolectaron datos de forma continua con una frecuencia de cada 10 minutos. Dichos datos se cotejaron con un equipo profesional Davis Vantage Pro2 donde se observó una gran similitud en las mediciones tomadas por ambos sistemas, conforme se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Gráficos estadísticos de comparativa entre el nodo principal y la estación de Davis

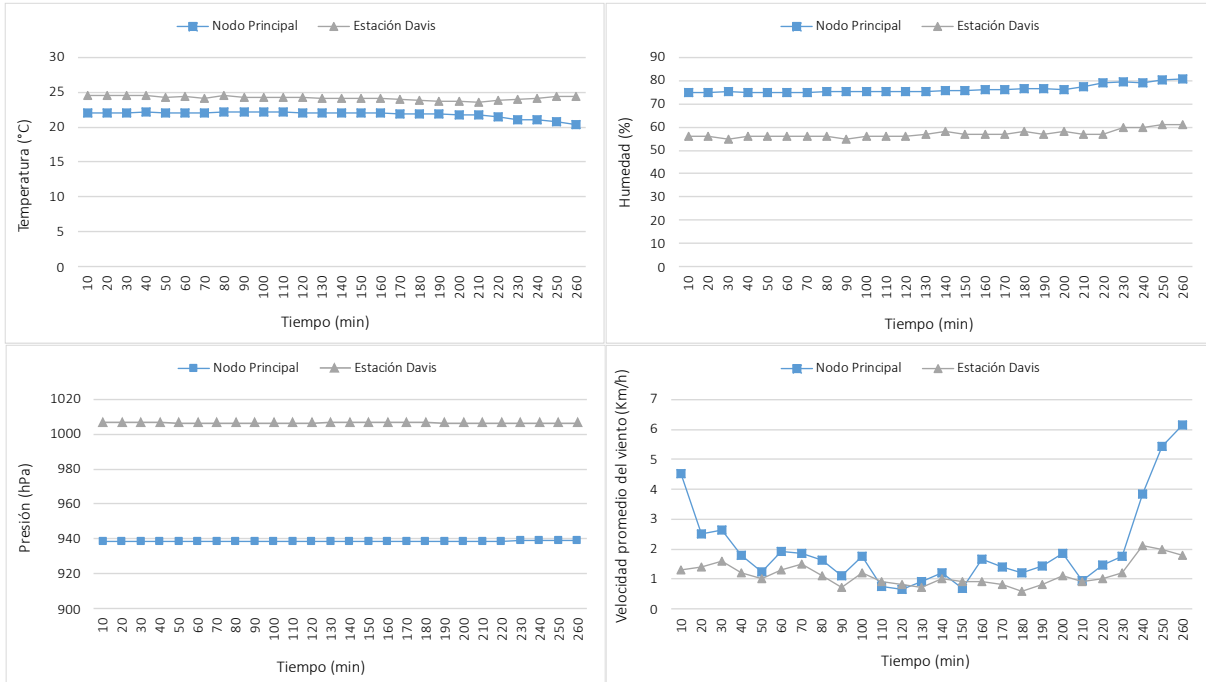
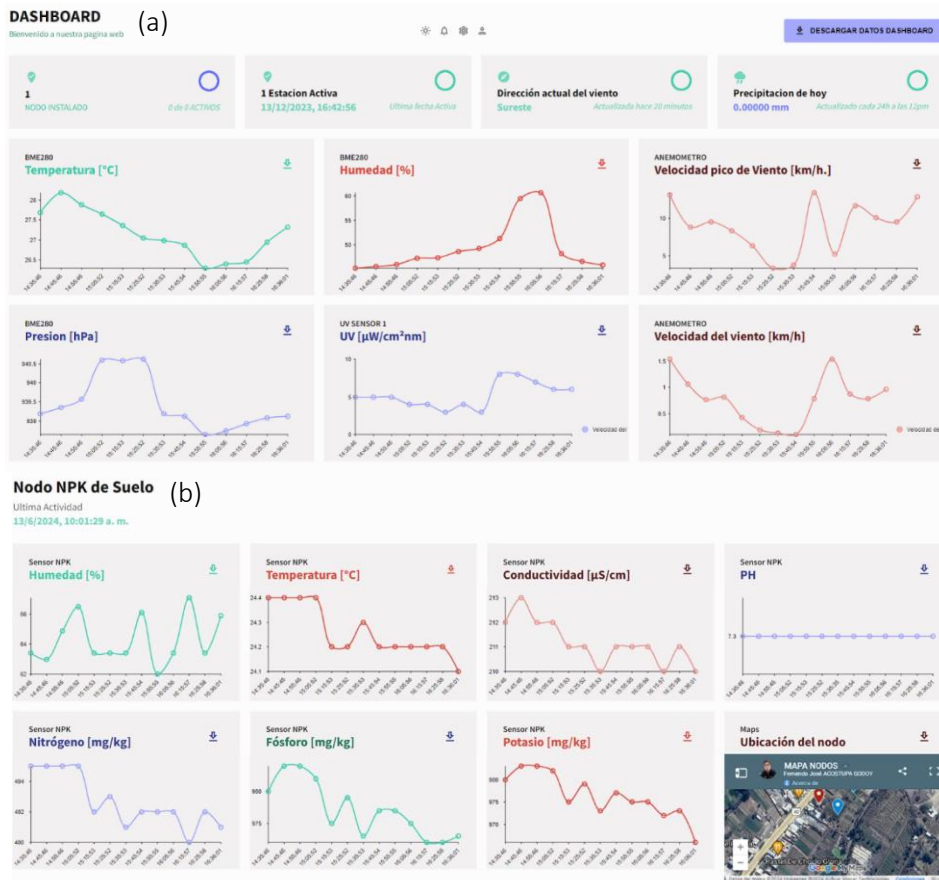


Figura 7

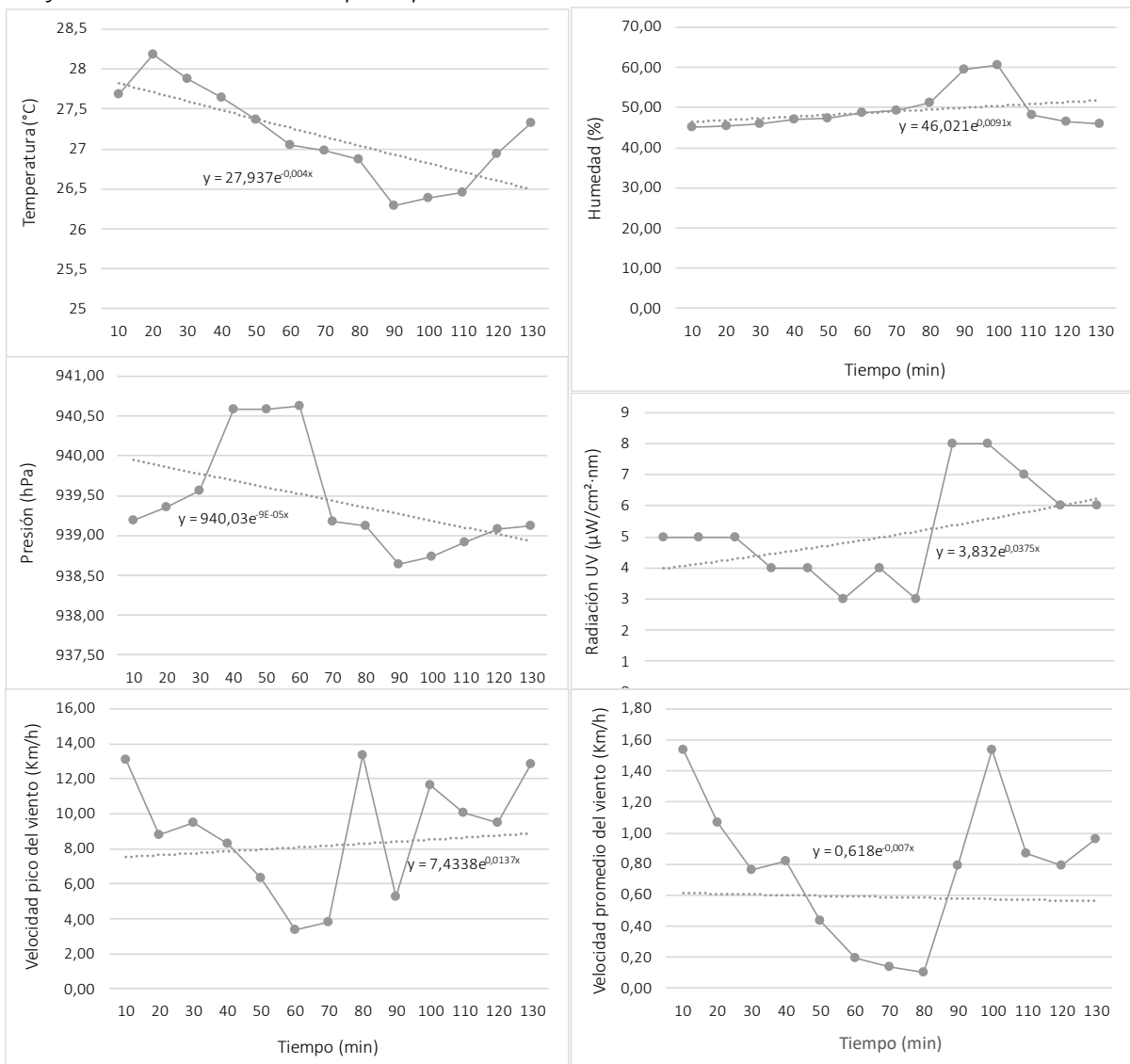
Diseño de la interfaz del nodo principal y la estación de Davis





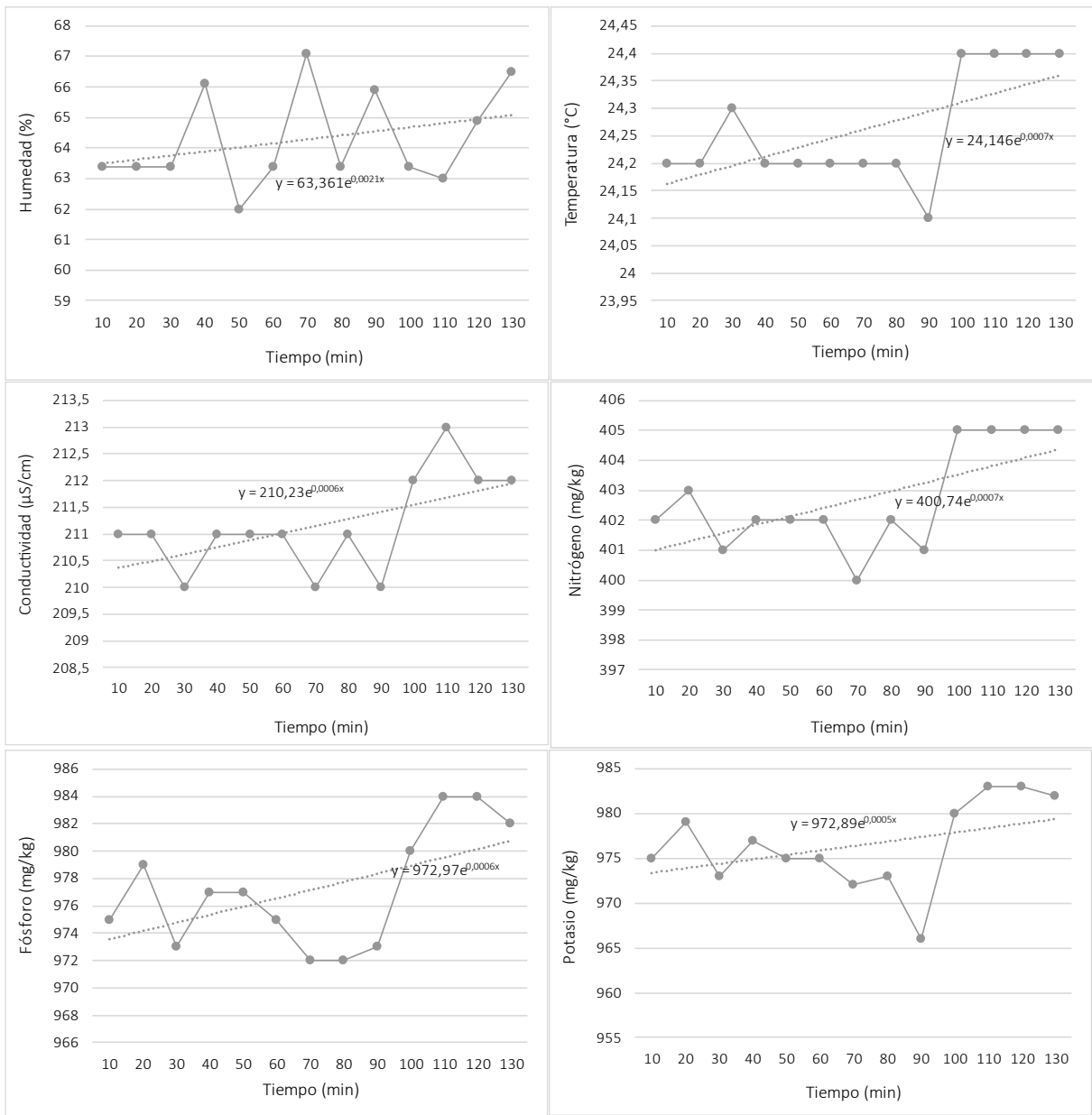
Luego, se desarrolló una Interfaz Humano-Maquina (HMI, Human-Machine Interface); siendo esta interfaz una página web que permite visualizar a distancia el comportamiento de los sensores a través de los datos registrados en el servidor de ThingSpeak. Para verificar la recepción de los datos recogidos a distancia por los sensores en el nodo central, la ubicación del nodo secundario se dejó encendido por dos horas durante las pruebas operativas. Los sensores de intensidad de la lluvia, de temperatura y humedad, de velocidad de viento, de dirección de viento y de radiación UV, obtuvieron resultados factibles. El sensor BME280 ubicado en el nodo central registró niveles elevados de temperatura y humedad ambiente. Para el sensor UV, se observó que el sensor registró un pico menor después de una exposición al ocaso. Simultáneamente, en la ubicación del nodo central, se registraron ráfagas de viento significativas, siendo estos datos evidenciados por el sensor de velocidad y dirección del viento que se mostró en la página web (Figura 7a). En cuanto al nodo secundario, las mediciones obtenidas con el sensor NPK fueron comparativamente uniformes entre sí. Esto se atribuye a la colocación del sensor en el suelo de cultivo, que se caracteriza por su humedad, y a la coherencia entre el pH del suelo y los macronutrientes presentes en el mismo (Figura 7b).

Figura 8
Gráfico estadístico del nodo principal



Estas mediciones se almacenaron en una base de datos en formato XLSX, lo que permitió su posterior visualización y descarga para obtener un reporte o la información completa. Es importante destacar que la página web fue diseñada para mostrar los datos de los sensores de los nodos central y secundario, además de permitir la supervisión remota de las mediciones realizadas en estos nodos.

Figura 9
Gráfico estadístico del nodo secundario



La Figura 8 presenta las mediciones de temperatura, humedad y presión atmosférica del sensor BME280, la precipitación registrada por el pluviómetro digital MS-WH-SP-RG, el nivel de radiación UV del sensor UV CJMCU-GUVA-S12SD, y la velocidad y dirección del viento obtenidas del anemómetro y la veleta del nodo central. En el primer gráfico, la temperatura varía entre 26 °C y 28,5 °C, mostrando un ligero ascenso inicial, seguido de una disminución constante y un aumento final. El segundo gráfico, correspondiente a la humedad, muestra un



incremento con dos picos altos antes de descender, con valores entre el 45 % y 60 %. En el gráfico de presión, los valores oscilan entre 938 y 941 hPa. Las gráficas de velocidad del viento, tanto pico como promedio, exhiben un comportamiento similar. Por último, en el gráfico de radiación UV, se observa una tendencia descendente hasta un aumento repentino seguido de otra caída.

La Figura 9 muestra las mediciones de temperatura, humedad, conductividad eléctrica, pH, nitrógeno, fósforo y potasio obtenidas del sensor de suelo JXBS-3001-NPK-RS del nodo secundario. Los datos indican una mínima variación en todas las variables medidas. Durante las 2 horas de monitoreo, la temperatura del suelo fluctuó solo 0,3 °C, la humedad varió entre el 62 % y 67 %, y la conductividad eléctrica mostró una diferencia de 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre el inicio y el final. El pH permaneció constante a lo largo del período de medición, mientras que las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio mostraron variaciones mínimas.

4. Discusión

El análisis comparativo de las variables meteorológicas registradas tanto en el "Nodo Principal" como en la "Estación Davis" revela diferencias clave en las mediciones, como las variaciones en la temperatura y humedad del 11 % y 25 % respectivamente, que pueden atribuirse a diferencias en la ubicación de los sensores o sus calibraciones específicas, esto también se puede observar en los valores obtenidos en dirección y velocidad del viento con una variación del 4 % y 36 %. Estas discrepancias subrayan la importancia de la precisión en la colocación y mantenimiento de los equipos meteorológicos para obtener datos fiables. Por otro lado, la consistencia en los valores de presión atmosférica entre ambas estaciones es indicativa de una buena calibración y puede servir para validar la precisión de otros sensores menos consistentes.

Al comparar el prototipo implementado con los propuestos por Palaguachi (2018), se observa que el primero utiliza diferentes sensores para medir presión atmosférica, temperatura y humedad, mientras que la estación implementada emplea un solo sensor para recopilar todos estos datos. Por otro lado, Iftikhar et al. (2023) describen una red de sensores que miden principalmente temperatura y presión atmosférica, con el nodo principal equipado con sensores de viento (dirección y velocidad), pero sin un pluviómetro para registrar precipitaciones. Finalmente, Küçükdermenci (2024) presentó una simulación de una estación meteorológica que utiliza sensores similares a los mencionados; sin embargo, a diferencia de las demás, esta estación no posee nodos ni conexión a internet, y en su lugar, cuenta con una pantalla LCD como interfaz hombre-máquina (HMI) para visualizar los datos recolectados.

En cuanto al nodo secundario equipado con un sensor NPK de suelo 7 en 1, Pratama et al. (2021) presentaron un sistema IoT para el monitoreo de nutrientes del suelo (N, P y K), similar al desarrollado por Gottemukkala et al. (2023). Por su parte, Balamurugan et al. (2021) implementaron un sistema IoT automatizado para riego y fertilización, utilizando el mismo tipo de sensor NPK junto con sensores de humedad del suelo, temperatura y los actuadores necesarios. En comparación con estos diseños, el sensor NPK utilizado en el presente estudio es una versión más avanzada para el monitoreo de zonas agrícolas. Sin embargo, la información obtenida por el sensor NPK 7 en 1 no fue validada debido a la falta de un equipo especializado para contrastar los resultados, a diferencia de lo realizado con la estación meteorológica, que sí pudo compararse con la estación profesional de la marca Davis.

5. Conclusiones

La implementación de una estación IoT para monitorear microclimas y condiciones del suelo es esencial para adaptar las estrategias agrícolas frente al cambio climático, mejorando la precisión y eficiencia, como destacan estudios previos. La recopilación continua de datos en tiempo real permite ajustar prácticas como la selección de cultivos, el riego y la aplicación de nutrientes, optimizando así el rendimiento y la calidad. Además, la tecnología IoT facilita la evaluación de la resistencia y adaptabilidad de los cultivos ante condiciones climáticas variables, lo que permite una toma de decisiones más rápida e informada.

A futuro, se planea expandir la capacidad de la red de sensores para incluir la detección de gases nocivos y mejorar la interfaz de usuario para proporcionar recomendaciones automatizadas basadas en los datos recogidos. Este avance permitirá no solo mejorar la precisión en la aplicación de agua y nutrientes, sino también contribuir significativamente a la minimización de impactos ambientales adversos, como la emisión de gases de efecto invernadero desde prácticas agrícolas.

También se prevén pruebas de escalabilidad en diferentes regiones para validar la universalidad del sistema y ajustar algoritmos predictivos con inteligencia artificial. Estos desarrollos no solo optimizarán las prácticas agrícolas y reducirán los impactos ambientales negativos, sino que también posicionarán la tecnología IoT como una herramienta clave en la lucha contra el cambio climático y en la mejora de la seguridad alimentaria global.

Contribución de los autores

W. E. Salgado: Análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, validación y redacción – revisión y edición. **G. E. D. Bacigalupo:** Conceptualización, Curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, visualización y redacción del borrador original. **F. J. Acostupa:** Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, software, visualización y redacción del borrador original. **T. L. Córdova:** Conceptualización, adquisición de fondos, metodología, administración del proyecto, provisión de recursos, supervisión, validación y redacción – revisión y edición. **H. J. Rivera:** Conceptualización, adquisición de fondos, metodología, administración del proyecto, provisión de recursos, supervisión, validación y redacción – revisión y edición del manuscrito.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, por el financiamiento otorgado mediante la modalidad Círculos de Investigación a través de la resolución N°. 049-CF-2023-FAING/UPT.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.



6. Referencias Bibliográficas

- Aguilar, S. (2020). *Diseño de una solución basada en el internet de las cosas (IoT) empleando Lorawan para el monitoreo de cultivos agrícolas en Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2946>
- Almada, A. H. (2020). *Estación meteorológica Anemómetro y Pluviómetro* [Proyecto final de grado, Universidad Nacional de Mar del Plata]. <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/handle/123456789/469>
- Almarcha, M. (2023, 11 de octubre). Previsión de lluvias en el Puente del Pilar 2023: ¿Cuándo va a llover? *Eltiempo.es*. <https://www.eltiempo.es/noticias/ultima-hora-puente-del-pilar-2023-todo-sobre-el-cambio-de-tiempo>
- Balamurugan R., Dineshkumar T., Malarvizhi C., Yogeshwaran A., Kaarthik K. & Sagayaraj R. (2021). IoT Based Farm Housing Using NPK Sensors. *Annals of The Romaian Society for Cell Biology*, 25 (6), 581-590. <http://annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/5467>
- Cheruvu, B., Latha, S. B., Nikhil, M., Mahajan, H., & Prashanth, K. (2023, del 17 al 18 de marzo). Smart Farming System using NPK Sensor [Conferencia]. *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10112795>
- Čolaković, A., & Hadžialić, M. (2018). Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks*, 144, 17–39. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.017>
- Đorđević, M., Paunović, V., Danković, D., & Jovičić, B. (2020). Smart autonomous agricultural system for improving yields in greenhouse based on sensor and IoT technology. *Istrazivanja i Projektovanja Za Privredu*, 18(4), 606–613. <https://doi.org/10.5937/jaes0-26722>
- Fisher, D., Woodruff, L., Anapalli, S., & Pinnamaneni, S. (2018). Open-source wireless cloud-connected agricultural sensor network. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(4), 1-13. <https://doi.org/10.3390/jsan7040047>
- Flores, L. M., Dell'Aquila, C., Santalucía, J. R., & Sistema, C. A. (2015, del 28 al 30 de octubre). Wireless sensor network for seismic monitoring with Internet Access [Conferencia]. *2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, Santiago, Chile. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7400348>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2015). *Climate change and food security: risks and responses*. <https://goo.su/CUBq00J>
- Gottemukkala, L., Jajala, S. T. R., Thalari, A., Vootkuri, S. R., Kumar, V., & Naidu, G. M. (2023). Sustainable crop recommendation system using soil NPK sensor. *E3S web of conferences*, 430, 01100. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001100>
- Iftikhar, T., Ahmad, S. Z., Iqbal, M. W., Arif, S., Hamid, K., & Nazir, M. A. (2023). Cost-effective IoT-based weather monitoring system development and improving average crop

- production. *Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)/Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 42(2). <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/TKAH8>
- Jamroen, C., Fongkerd, C., Krongpha, W., Komkum, P., Pirayawaraporn, A., & Chindakham, N. (2021). A novel UV sensor-based dual-axis solar tracking system: Implementation and performance analysis. *Applied Energy*, 299(117295), 117295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117295>
- Küçükdermenci S. (2024, 18 al 19 de abril). Design of A Cost-Effective Weather Station with Rain Forecast [Conferencia]. *2nd International Conference on Scientific and Innovative Studies*, Konya, Turkey. 909–916. <https://goo.su/ZiwVz>
- Kumar, L., Chhogyel, N., Gopalakrishnan, T., Hasan, M. K., Jayasinghe, S. L., Kariyawasam, C. S., Kogo, B. K., & Ratnayake, S. (2022). Climate change and future of agri-food production. En *Future Foods* (pp. 49–79). Elsevier.
- Muangprathub, J., Boonnam, N., Kajornkasirat, S., Lekbangpong, N., Wanichsombat, A., & Nillaor, P. (2019). IoT and agriculture data analysis for smart farm. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 467–474. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.011>
- Musa, P., Sugeru, H., & Wibowo, E. P. (2023). Wireless Sensor Networks for precision agriculture: A review of NPK sensor implementations. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(1), 51. <https://doi.org/10.3390/s24010051>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2019). Desafíos globales: población. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Palaguachi, S. I. (2018). *Diseño, desarrollo e implementación de una estación meteorológica basada en una red jerárquica de sensores, software libre y sistemas embebidos para la Empresa ELECAUSTRO en la Minicentral Gualaceo utilizando comunicación MQTT y MODBUS* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16056>
- Pereira, G. P., Chaari, M. Z., & Daroge, F. (2023). IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. *Internet of Things*, 4(3), 221–243. <https://doi.org/10.3390/iot4030012>
- Petracci, R., Culmone, R., & Mostarda, L. (2024). Blockchain Application for Fish Origin Certification. En Barolli, L. (Ed.). *Advances on Broad-Band and Wireless Computing, Communication and Applications* (pp. 149–158). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46784-4_13
- Pratama, H., Yunan, A., & Arif Candra, R. (2021). Design and build a soil nutrient measurement tool for citrus plants using NPK soil sensors based on the internet of things. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 1(2), 67–74. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v1i2.1300>
- Sánchez, C. A. (2016). Evolución del concepto de cambio climático y su impacto en la salud pública del Perú. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 33(1), 128. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2016.331.2014>