

Precision Agricultural Management System Based on Integrated Technologies

Juan D. González¹; Andrés-F Jiménez²; Luisa F. Ramírez³

^{1,2,3}Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Colombia, jdgonzalez.urrego@unillanos.edu.co, ajimenez@unillanos.edu.co, lfernandaramirez@unillanos.edu.co

Abstract—Intelligent resource management in agriculture reduces costs and maximizes production yields with minimal inputs, contributing positively to environmental sustainability. New technologies based on digital agriculture allow for estimating the quantity, location, and timing of agricultural input applications according to the actual needs of plants and soil. Current technologies such as the World Wide Web, the Internet of Things (IoT), sensor networks, and artificial intelligence are widely used in agriculture. The purpose of this work is to demonstrate the progress in developing a web platform based on Industry 5.0 technologies that supports irrigation management in agricultural crops and their adaptation to climate change by leveraging the existing relationships between the environment, plants, and soil. The following sections detail the system architecture design, the development of data acquisition modules, remote information management, and its implementation in a real-world environment. The work developed is a tool that supports intelligent decisions, helping farmers to take actions in the field based on information.

Keywords— Artificial intelligence, decision support, internet of things, management, precision agriculture.

Sistema de Gestión Agrícola de Precisión Basado en Tecnologías Integradas

Juan D. Gonzalez¹; Andrés F. Jiménez²; Luisa F. Ramírez³

^{1,2,3}Universidad de los Llanos, Colombia, jdgonzalez.urrego@unillanos.edu.co, ajimenez@unillanos.edu.co, lfernandaramirez@unillanos.edu.co

Resumen— La gestión inteligente de los recursos en el campo agrícola incide en la disminución de los costos, la obtención de rendimientos de producción con la mínima cantidad de insumos, aportando positivamente a la sostenibilidad ambiental. Las nuevas tecnologías basadas en la agricultura digital permiten estimar las necesidades en cuanto a cantidad, lugar y tiempos de aplicación de insumos agrícolas según las necesidades reales de las plantas y el suelo. Las tecnologías actuales de la WEB (World Wide Web), el Internet de las cosas (IoT, Internet of things), las redes de sensores y la inteligencia artificial son ampliamente usadas en la agricultura. El propósito de este trabajo es mostrar los avances en el desarrollo de una plataforma WEB fundamentada en las tecnologías de la Industria 5.0 que permite apoyar en la gestión del riego en cultivos agrícolas y su adaptación al cambio climático mediante el uso de las relaciones existentes entre el ambiente, las plantas y el suelo. A continuación, se evidencia el diseño de la arquitectura del sistema y el desarrollo de módulos de adquisición de datos, la gestión de información de manera remota y su implementación en un ambiente real. El trabajo desarrollado es una herramienta que soporta decisiones inteligentes, favoreciendo la toma de decisiones en campo, basadas en información.

Palabras clave— agricultura de precisión, inteligencia artificial, internet de las cosas, gestión, soporte a decisiones.

I. INTRODUCCIÓN

Los desarrollos de las tecnologías aplicadas a la agricultura han evolucionado con el paso de los años. La *Agricultura 1.0* se refiere a aquella que se desarrollaba con la fuerza animal y humana, con herramientas sencillas y rendimientos de producción demasiado bajos. En la *Agricultura 2.0* se utilizaron ampliamente las máquinas, lo que condujo a la aplicación excesiva de químicos, la degradación del entorno ecológico y el uso ineficiente de los recursos naturales. La *Agricultura 3.0* surgió en el siglo XX con los avances de la electrónica y el desarrollo de software [1]. Posteriormente, la *Agricultura 4.0* emplea las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*, en inglés), el manejo de grandes cantidades de datos, la *Inteligencia Artificial*, la computación en la nube y la teledetección. Finalmente, la *Agricultura 5.0* consiste en la integración de tecnologías avanzadas y sistemas inteligentes para optimizar la producción agrícola. Según [1], la aplicación de estas tecnologías puede mejorar significativamente la eficiencia de las actividades agrícolas.

La agricultura 5.0 busca el aumento de la productividad agrícola debido al crecimiento demográfico y la escasez de alimentos [2]. Por otro lado, busca la asignación razonable de recursos naturales, resaltando las condiciones actuales de suelos degradados, el mal uso de los recursos hídricos y los efectos del

cambio climático. Los efectos del cambio climático han provocado sequías, inundaciones y condiciones climáticas extremas, por lo cual es necesario que la agricultura sea más resiliente a estos cambios [3]. Finalmente se debe evitar el desperdicio de alimentos proveniente de cada etapa del ciclo de vida agrícola, incluyendo la producción, la distribución y la comercialización. Debido a la excesiva aplicación de insumos químicos, la falta de control de plagas y el desconocimiento de las adaptaciones al cambio climático, conducen al desperdicio de alimentos y daños a las tierras de cultivo [4].

La inteligencia artificial tiene una amplia variedad de aplicaciones en la vida cotidiana, como por ejemplo la medicina, el entretenimiento, las comunicaciones, la industria espacial y por supuesto en el sector agropecuario. Se ha evolucionado de usar sistemas expertos y algoritmos de decisión a sistemas de inferencia basados en lógica difusa y aprendizaje profundo [5]. En el campo agrícola, por ejemplo, las aplicaciones de la inteligencia artificial en los sistemas de prescripción y predicción de riego son una herramienta de mitigación notable para disminuir los impactos del cambio climático en los sistemas de producción agrícola [6].

El Internet de las Cosas, por su parte, ha influenciado en el desarrollo de múltiples industrias, ofreciendo oportunidades para mejorar la productividad, la eficiencia y la sostenibilidad en la agricultura [7]. Los sistemas IoT están compuestos por sensores, dispositivos electrónicos y software interconectados que permiten el seguimiento de parámetros importantes para la gestión de los cultivos agrícolas en tiempo real, como la humedad del suelo, la temperatura, la humedad relativa, la temperatura de las hojas y la salud de los cultivos. Estos sistemas proporcionan datos continuos esenciales para la toma de decisiones informada, permiten el control y la monitorización del riego automático, las condiciones climáticas y el control de plagas, buscando optimizar de esta manera el uso de recursos, aumentar el rendimiento en producción y la reducción de los impactos ambientales [8]. Además, el IoT es fundamental en la investigación experimental en agricultura, proporcionando una comprensión integral de cómo interactúan las diferentes variables en condiciones reales de campo, que son monitoreadas en tiempo real, mejorando la fiabilidad de los resultados experimentales [9].

Se han desarrollado numerosas investigaciones en las que se usa el internet de las cosas y la inteligencia artificial para la gestión de los cultivos. Por ejemplo, en [10] implementaron un sistema de riego pivotante usando IoT e inteligencia artificial en el que se analizan imágenes para detectar problemas y tomar decisiones para el manejo del riego, gestionar los requerimientos nutricionales y controlar plagas y enfermedades

de las plantas. También se han realizado desarrollos que automatizan la aplicación del riego por goteo, lo que ha permitido mejorar la eficiencia en el uso del agua [11]. En [12], muestran las altas precisiones de los sistemas basados en IoT con sensores para el seguimiento de la temperatura del suelo y los nutrientes, careciendo de aplicabilidad con entornos Web. En [13] aplicaron IoT a sistemas de riego inteligentes para monitorear humedad del suelo y algunas variables climáticas, con bondades tecnológicas de precisión moderada y rentabilidad, sin integración con aplicaciones en la nube. También en [14], se utilizan los sistemas de soporte de decisiones, pero sin soporte Web ni móvil. En cuanto a la gestión de recursos basado en IoT [15] destacan enfoques innovadores como drones, sensores remotos satelitales, conjuntos extensos de datos y aprendizaje automático. En [16] se muestra un sistema IoT portable que permite el seguimiento de los nutrientes del suelo (nitrógeno, fósforo y potasio), ayudando a los productores a tomar decisiones informadas acerca de la fertilización. Además, en [17], desarrollaron un dispositivo IoT avanzado con aprendizaje automático para seguir la humedad de suelo y otras condiciones, ofreciendo recomendaciones sitio-específicas, disminuyendo la aplicación de insumos y mejorando el rendimiento de producción.

Los avances tecnológicos y la gran cantidad de datos que se pueden recopilar en el campo usando diferentes tipos de sensores no se traducen en información práctica para un agricultor convencional, dificultando la toma de decisiones con base a la tecnología [18]. Uno de los grandes desafíos es el costo financiero de la implementación e instalación de sensores y accesorios IoT en un cultivo de grandes extensiones, con incertidumbre entre costos de implementación y los retornos obtenidos, además de la seguridad de los datos a gran escala [19]. Finalmente, un reto importante es el desarrollo de soportes y cajas de protección resistentes a factores ambientales adversos.

Estas limitaciones evidencian la necesidad de enfoques investigativos más integrales, actualizados, holísticos, con inclusión de la amplia gama de tecnologías digitales y sus recientes avances en la gestión de cultivos agrícolas [20]. Estas investigaciones y desarrollos tecnológicos deben buscar apoyar en la toma de decisiones basadas en evidencias reales del campo, pero entendibles para el agricultor o productor [21].

En este documento se muestran los avances alcanzados en la implementación de una plataforma tecnológica útil para la generación de estudios agronómicos especializados en agricultura de precisión y el manejo de recursos e insumos en cultivos agrícolas, con el concepto de agricultura inteligente [22]. Se presentan los avances en el desarrollo de un sistema inteligente implementado en una plataforma Web basado en modelamiento de cultivos, redes de sensores, sistemas de inferencia basados en inteligencia artificial, sistemas de información geográfica, internet de las cosas y computación en la nube, como una herramienta útil para mejorar la eficiencia del manejo de cultivos agrícolas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El *Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales* se desarrolla en las instalaciones de la Universidad de los Llanos, en el Campus Barcelona, ubicado en Villavicencio, Meta, Colombia. La Fig. 1 presenta una vista general de la arquitectura del Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales. Este diagrama permite visualizar los principales componentes del sistema y la transferencia de datos desde los nodos de sensores hasta el usuario final a través de internet.

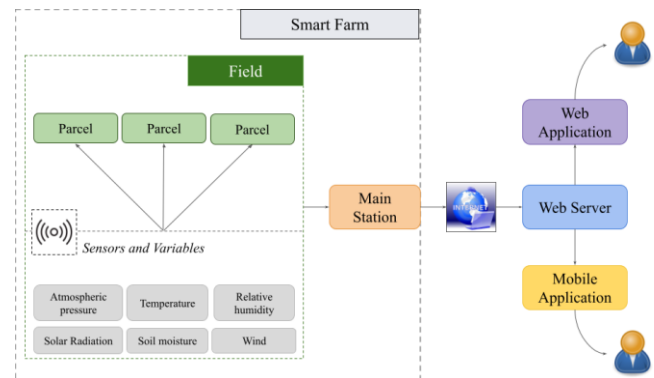


Fig. 1 Descripción General del Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales.

El flujo de trabajo descrito en la Fig. 1 es el siguiente: el *Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales* comienza con la captura de datos de los sensores ubicados en las parcelas de una finca. Una vez recopilada la información, se transmite mediante radios de comunicación LoRa, a una estación central (Raspberrypi), para posteriormente enviar los datos a la nube. El servidor web se desarrolló utilizando el framework Django junto con el sistema de gestión de contenido Wagtail.

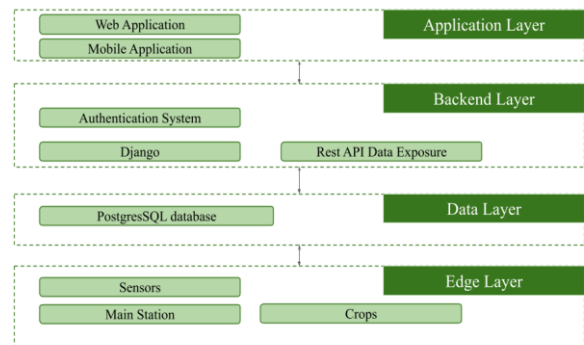


Fig. 2 Capas del Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales

El *Sistema de Adquisición y Monitoreo de Variables Ambientales* puede organizarse en capas que agrupan diferentes componentes, como se muestra en la Fig. 2. La *Capa de Borde* abarca todos los elementos físicos, desde los cultivos de producción hasta los sensores y la estación central. La siguiente capa, la *Capa de Datos*, está representada por la base de datos,

encargada de almacenar la información recopilada para garantizar su persistencia. A continuación, se encuentra la *Capa Backend*, que comprende toda la lógica y las funcionalidades del servidor web. Finalmente, la *Capa de Aplicación* incluye tanto la *Aplicación Web* como la *Aplicación Móvil*, que permiten al usuario interactuar con el sistema y visualizar la información procesada.

La función inicial de la *Estación Principal* (Fig. 3) es recibir datos de los sensores instalados en cada parcela o lote del cultivo. Debido a que los datos se registran a intervalos de tiempo definidos, el almacenamiento temporal es otra función clave de la *Estación Principal*. Este mecanismo garantiza que, en caso de interrupciones temporales de la conexión a internet, la información permanezca disponible hasta que se transmita correctamente. Los procesos de almacenamiento temporal y procesamiento ligero se ejecutan casi simultáneamente. Posteriormente, se comprueba que la Raspberry Pi tenga conexión a internet antes de pasar a la siguiente etapa. Finalmente, el componente implementa un módulo de comunicación con el servidor web, utilizando protocolos estandarizados como HTTP y MQTT. Esto permite enviar información desde la granja al servidor web y luego a la plataforma de monitoreo en línea.

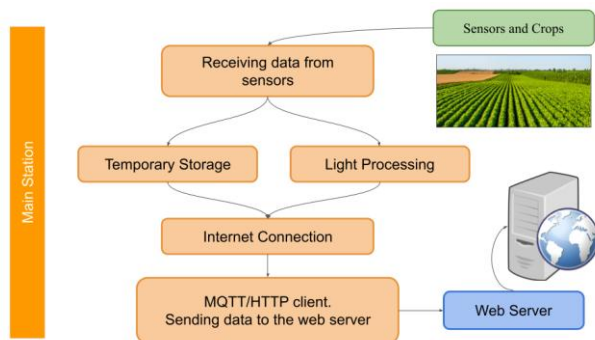


Fig. 3 Estación Principal.

La Fig 4 muestra las funciones principales del componente *Servidor Web*. Este componente se encarga de gestionar, procesar y almacenar la información recibida de la estación central. Este componente garantiza la persistencia de los datos y el acceso seguro a las funcionalidades del sistema por parte de los usuarios autorizados. Primero, el *Servidor Web* recibe los datos enviados por la *Estación Central*, que se exponen mediante una *API Rest*. Posteriormente, los datos se procesan para su validación, almacenamiento en la base de datos y posterior uso. El sistema también integra un módulo de autenticación que garantiza que solo los usuarios con credenciales válidas puedan acceder a la información y a las herramientas de gestión. De igual modo, solo las estaciones principales con credenciales correctas pueden enviar la recopilación de datos al servidor web.

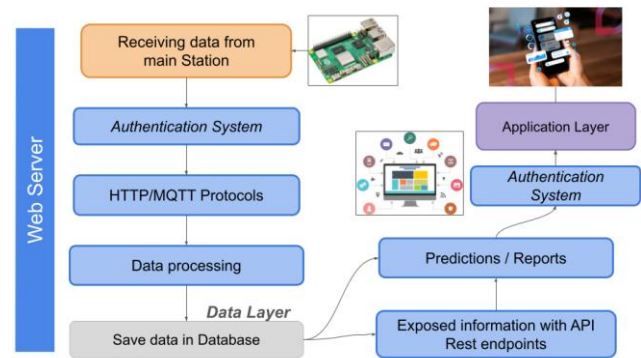


Fig. 4 Servidor Web

Además, este servidor ofrece la posibilidad de generar informes y predicciones a partir de los datos históricos recopilados mediante procesamiento asíncrono. Estos informes permiten al usuario final obtener información analítica y facilitar la toma de decisiones. Tanto los datos como los informes se exponen mediante una *API Rest*, que será utilizada por el usuario final en la capa de aplicación.

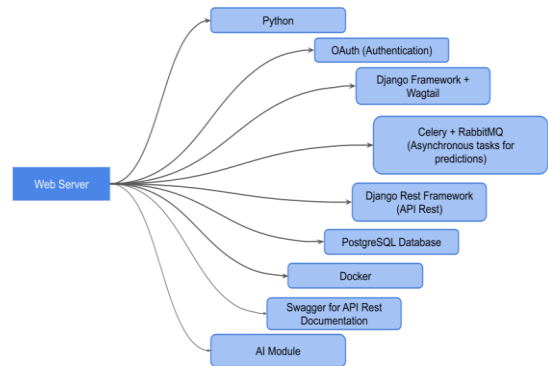


Fig. 5 Pila tecnológica para el servidor web.

El servidor web se implementó utilizando un conjunto de tecnologías que garantizan su escalabilidad, seguridad y flexibilidad. La Fig 5 ilustra las principales herramientas utilizadas: Python, como lenguaje principal para el desarrollo backend; Django Framework + Wagtail, responsable de la construcción del núcleo del sistema y del gestor de contenido; Django Rest Framework (DRF), permite la exposición de una *API Rest* para la comunicación con la estación central y clientes web o aplicaciones móviles. OAuth, es el protocolo de autenticación para control que garantiza el acceso seguro, permitiendo que la aplicación *Frontend* un token de acceso al momento del inicio de sesión del usuario. Este token es enviado en cada petición al API REST, de modo que el servidor valida su autenticidad antes de entregar cualquier dato. Esta autenticación se mantiene también en las conexiones WebSocket, garantizando que solo los usuarios autenticados puedan recibir los datos en tiempo real. De esta manera, solo los usuarios autenticados pueden acceder a la información de los sensores y estado de los cultivos. Celery + RabbitMQ, se

encarga de la gestión de tareas asíncronas, especialmente para el procesamiento intensivo de predicción y análisis. En el módulo *Inteligencia Artificial* se han evaluado modelos de redes recurrentes LSTM y NARX, que según resultados reportados en [23] han alcanzado coeficientes de correlación r^2 superiores a 0,82, con valores de hasta 0,99. La selección del modelo final se realizará en función de su precisión y viabilidad computacional. PostgreSQL es el sistema de gestión de bases de datos relacionales, responsable del almacenamiento de datos estructurados. Finalmente, Docker, es la herramienta empleada para generar contenedores para todo el proyecto, facilitando la portabilidad, la implementación y la escalabilidad del sistema.

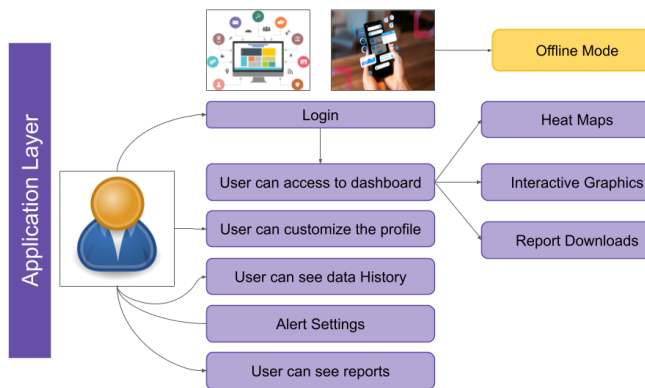


Fig. 6 Funciones principales de la capa de aplicación (web y móvil).

La *Capa de Aplicación* se refiere al conjunto de herramientas y servicios dirigidos al usuario final, que integra tanto la aplicación web como la aplicación móvil. Estas aplicaciones proporcionan una interfaz gráfica moderna, interactiva e intuitiva que permite a los usuarios consultar, gestionar y visualizar la información recopilada y procesada por el sistema. La Fig 6 muestra la interacción de ambas aplicaciones con el *Servidor Web*, desde el cual consumen servicios como la API Rest, el procesamiento de datos y los sistemas de autenticación. Tanto la *Aplicación Web* como la móvil comparten un núcleo funcional similar, aunque con ligeras adaptaciones en la presentación y la accesibilidad según la plataforma utilizada.

III. RESULTADOS

En esta etapa del proyecto se ha desarrollado el prototipo de adquisición de datos en campo. Cada sensor fue precalibrado y configurado para transmitir información en tiempo real a la estación principal a través del protocolo LoRa WAN [25]. Los sensores implementados permiten la medición de temperatura ambiente, la temperatura foliar, la humedad relativa y la humedad del suelo. La Fig 7 muestra el montaje de los sensores de campo diseñados e implementados. Se usaron los sensores Watermark 200SS: sensor de resistencia eléctrica para medir la tensión matricial del suelo (humedad disponible), el sensor GY-906 (MLX90614), que es un sensor infrarrojo de medición

de temperatura del dosel con una precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ [26]. Además, se utilizó el sensor ENV III (SHT30 + QMP6988), que permite medir temperatura, humedad relativa y presión barométrica. Este sensor ofrece una precisión de $\pm 2\%$ en humedad relativa, $\pm 0,2^\circ\text{C}$ en temperatura y $\pm 3,9\text{ Pa}$ en presión barométrica [24]. El nodo se alimenta mediante un sistema fotovoltaico autónomo: un panel solar monocristalino de 10 W, controlador de carga PWM y batería de 12 V / 7.5 Ah. En la Fig. 8, se muestra un nodo de sensores instalado en el campus de la Universidad de los Llanos.

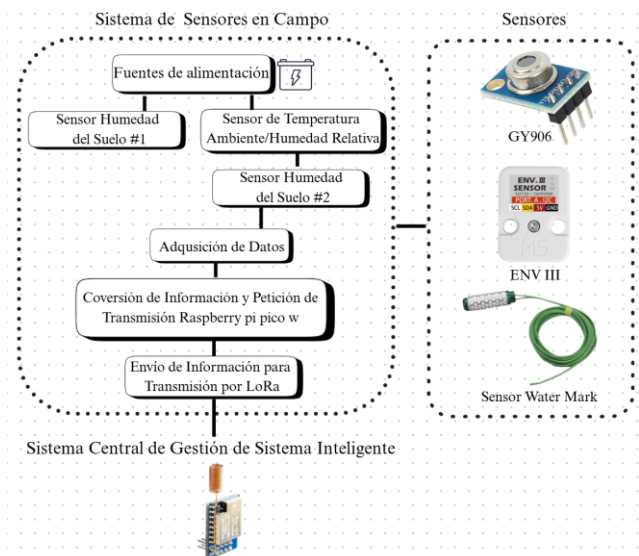


Fig. 7 Implementación de sensores de campo.



Fig. 8 Nodo de sensores para instalación en campo.

Con el fin de evaluar la viabilidad económica del sistema para pequeños agricultores, se toma como referencia el análisis de costos de hardware presentado en [6], cuya arquitectura de nodos es comparable a la empleada en el presente prototipo. El costo del módulo de sensado de campo (SMSA, 331,55 USD), la estación meteorológica (WSS, 98,12 USD) y la estación central (ACS, 166,90 USD) obteniendo como resultado la suma

total de 596,57 USD. De la misma forma, en [6] se evidencia que un agente inteligente de riego fue comparado con dos métodos convencionales: sensores de humedad de suelo (VWC) y balance hídrico (ETc), en un cultivo de cebolla. En cuanto al agua aplicada, el sistema inteligente usó entre 91,3 mm y 127,3 mm según el tratamiento, claramente por debajo del método VWC que llegó hasta 350,2 mm. Lo más destacable es la eficiencia en el uso del agua (WUE): el sistema inteligente alcanzó valores de entre 1,7 y 1,8 kg/m³, superando al método ETc en todos los tratamientos, y mejorando notablemente al método VWC.

En la Figura 9 se muestra la ventana de administración de la plataforma *Web - AdminSite interface*, que es la que permite el manejo de la aplicación por parte del Administrador de la plataforma.

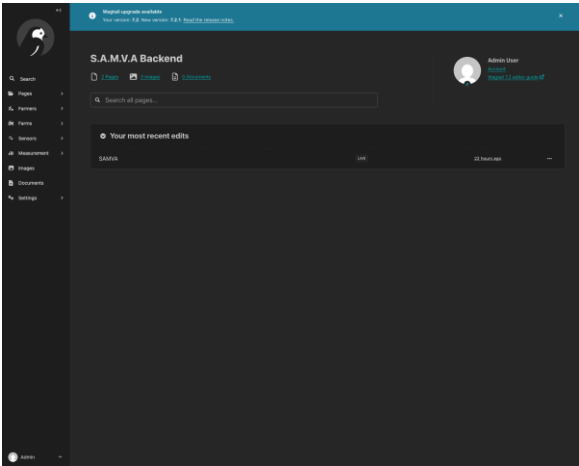


Fig. 9 Ventana de Administración - AdminSite interface.

Las Figura 10 presenta la vista principal de la plataforma: un panel general, donde el agricultor puede visualizar de forma clara indicadores como el estado del cultivo, la humedad del suelo, la temperatura y las recomendaciones de riego; e incluso una vista geoespacial del lote, que permite ubicar las parcelas, identificar su estado hídrico y acceder a información detallada de cada zona como se aprecia en la Figura 11.

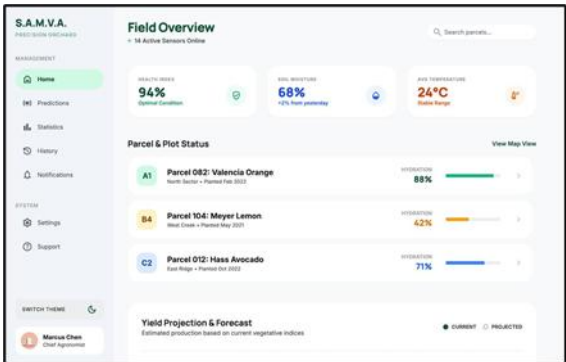


Fig. 10 Diseño del Panel Principal.



Fig. 11 Diseño de la Vista Geoespacial en el Panel Principal.

CONCLUSIONES

El sistema para la adquisición y el monitoreo de variables ambientales y de cultivo se implementó con éxito, integrando sensores de temperatura, humedad ambiente, temperatura del dosel y de humedad del suelo, lo que permitió la adquisición y el monitoreo de las diferentes variables ambientales en las parcelas de estudio.

La aplicación web desarrollada cumple su función como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en agricultura de precisión. Se está trabajando en el desarrollo del módulo de visualización de los datos recopilados en tiempo real, el análisis de tendencias históricas y el acceso a indicadores clave como los niveles de humedad del suelo y el estrés hídrico de las plantas, facilitando la gestión agronómica basada en datos.

La integración de los módulos de hardware y software demostró la viabilidad del sistema como plataforma IoT para el sector agrícola. La comunicación mediante redes inalámbricas (LoRa) y la gestión centralizada a través de un servidor web garantizan la transmisión confiable y continua de información, contribuyendo a la automatización de los procesos de monitoreo.

Las pruebas operativas y de simulación realizadas hasta el momento confirman la estabilidad y precisión del sistema, validando su potencial de aplicación en diversos tipos de cultivos. Los resultados demuestran que el sistema puede escalarse e integrarse con algoritmos predictivos para la planificación del riego y la gestión de recursos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada por los grupos de investigación Macrypt, semillero FarmTechnology y GIGAS, Semillero de investigación SIEAS de la Universidad de los Llanos e I2E de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Se agradece a la Universidad de los Llanos (DGI) - Colombia, por el apoyo para el desarrollo del proyecto: Sistema integrado de gestión agrícola con soporte web, IoT y modelos de inteligencia artificial, con código: C09-02-2026-005.

REFERENCIAS

[1] Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. Computers and

- Electronics in Agriculture, 170, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.
- [2] Yuan, J.J., Lu, Y.L., Ferrier, R.C., Liu, Z.Y., Su, H.Q., Meng, J., Song, S., Jenkins, A., 2018. Urbanization, rural development and environmental health in China. *Environ. Dev.* 28, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.10.002>.
 - [3] Kmoch, L., Pagella, T., Palm, M., Sinclair, F., 2018. Using local agroecological knowledge in climate change adaptation: A study of tree-based options in Northern Morocco. *Sustainability*. 10 (10). <https://doi.org/10.3390/su10103719>.
 - [4] van Evert, F.K., Fountas, S., Jakovetic, D., Cmojevic, V., Travlos, I., Kempenaar, C., 2017. Big data for weed control and crop protection. *Weed Res.* 57 (4), 218–233. <https://doi.org/10.1111/wre.12255>.
 - [5] Naqvi, S. M. Z. A., Hussain, S., Awais, M., Tahir, M. N., Saleem, S. R., Al-Yarimi, F. A., ... & Hu, J. (2025). Climate-resilient water management: Leveraging IoT and AI for sustainable agriculture. *Egyptian Informatics Journal*, 30, 100691. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2025.100691>.
 - [6] Jimenez, A. F., Cardenas, P. F., Jimenez, F., Ruiz-Canales, A., & López, A. (2020). A cyber-physical intelligent agent for irrigation scheduling in horticultural crops. *Computers and electronics in agriculture*, 178, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105777>.
 - [7] Sethi, S. S., & Sharma, P. (2023). New developments in the implementation of IoT in agriculture. *SN Computer Science*, 4(5), 503. <https://doi.org/10.1007/s42979-023-01896-w>.
 - [8] Liang, C., & Shah, T. (2023). IoT in agriculture: The future of precision monitoring and data-driven farming. *Eigenpub Review of Science and Technology*, 7(1), 85-104. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acac7e>.
 - [9] Mini, A., Anuradha, M. S., Asha, G. S. R., Rekha, J. S. S., Kamble, S., & Kulkarni, M. (2023). IoT based smart agriculture monitoring system. *International research journal of engineering and technology*, 10(4), 1442-1448.
 - [10] Debauche, O., Mahmoudi, S., Elmoulat, M., Mahmoudi, S. A., Manneback, P., & Lebeau, F. (2020). Edge AI-IoT pivot irrigation, plant diseases, and pests identification. *Procedia Computer Science*, 177, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.009>
 - [11] Gallardo, R. K., & Sauer, J. (2018). Adoption of labor-saving technologies in agriculture. *Annual Review of Resource Economics*, 10(1), 185-206. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023018>.
 - [12] Zhang, X., Zhang, J., Li, L., Zhang, Y., & Yang, G. (2017). Monitoring citrus soil moisture and nutrients using an IoT based system. *Sensors*, 17(3), 447. <https://doi.org/10.3390/s17030447>.
 - [13] Abhishek, M. B., Tejashree, S., Manasa, R., & Vibha, T. G. (2021, Marzo). Smart agriculture management system using internet of things (IoT). In *Proceedings of International Conference on Sustainable Expert Systems: ICSES 2020* (pp. 363-375). Singapore: Springer Singapore.
 - [14] Pitakaso, R., Sethanan, K., Tan, K. H., & Kumar, A. (2024). A decision support system based on an artificial multiple intelligence system for vegetable crop land allocation problem. *Annals of Operations Research*, 342(1), 621-656. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05398-z>.
 - [15] Anjaneyulu, M., Gaud, P. D., Keerthika, S., Merugu, R., Almusawi, M., Theethi, H. P., & Praveen, P. (2024). Sustainable practices for plant nutrient control using IoT. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 507, p. 01039). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450701039>.
 - [16] Hartono, R., Yoeseph, N. M., Purnomo, F. A., Safi'ie, M. A., & Bawono, S. A. T. (2024). Portable internet of things-based soil nutrients monitoring for precision and efficient smart farming. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 13(5), 3326-3333. <https://doi.org/10.11591/eei.v13i5.7928>.
 - [17] Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100880.
 - [18] Taechatanasat, P., Armstrong, L., 2014. Decision support system data for farmer decision making. In: *Proceedings of Asian Federation for Information Technology in Agriculture*, pp. 472–486.
 - [19] Rajak, P., Ganguly, A., Adhikary, S., & Bhattacharya, S. (2023). Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100776.
 - [20] Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., ... & Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. *Agricultural Water Management*, 309, 109347.
 - [21] Bwambale E, Abagale FK, Anornu GK. 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agric. Water Manag.*;260:107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>
 - [22] Jamshidi, B., Jolfaee, H. K., Mohammadpour, K., Seilsepour, M., Dehghanisanij, H., Hajnajari, H., ... & Atri, A. (2025). Internet of Things-based smart system for apple orchards monitoring and management. *Smart Agricultural Technology*, 10, 100715.
 - [23] Jiménez, A. F., Ortiz, B. V., & Lena, B. P. (2024). Real-time mapping of crop canopy temperature using a wireless network of infrared thermometers on a central pivot. *Measurement*, 230, 114570.
 - [24] M5Stack. (2023). ENV III unit with temperature, humidity and air pressure sensor (SHT30+QMP6988). <https://docs.m5stack.com/en/unit/envIII>
 - [25] LoRa Alliance. (2026). *LoRaWAN Link-Layer Specification v1.0.4*. lora-alliance.org
 - [26] Melexis. (2019). MLX90614 family: Single and dual zone infra-red thermometer in TO-39 package (Datasheet rev. 007). <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx90614>.