

Intelligent Irrigation Prescription System Based on Canopy Temperature Sensors

Andrés-F Jiménez López¹; Fabián-R Jiménez López² Santiago Sandoval Gutiérrez³;

^{1,3}Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Macrypt, Sistemas Dinámicos, Colombia,
ajimenez@unillanos.edu.co, ssandoval@unillanos.edu.co

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, I2E, Colombia, *fabian.jimenez02@uptc.edu.co*

Abstract – *Water resource management in agriculture is crucial for preventing yield losses and ensuring the most efficient use of resources. One irrigation prescription mechanism is the early and precise determination of plant water stress in a crop, enabling targeted irrigation. Infrared sensors measure the temperature of the plant canopy, reflecting the relationship between radiation, transpiration, and plant water status. This document presents the progress in the design and implementation of a prototype data acquisition system using electronic devices to determine plant water stress in an agricultural crop, based on leaf temperature measurements. The system acquires data and transmits it to a central station for monitoring and, in the next stage of the project, to define irrigation prescriptions using a deep learning model (LSTM). These advancements demonstrate the applicability of the developed system to irrigation management in agricultural crops.*

Keywords -- *Agriculture, canopy, precision irrigation, prescription, water.*

Sistema Inteligente para la Prescripción de Riego Basado en Sensores de Temperatura del Dosel

Andrés-F Jiménez López¹, Fabián-R Jiménez López², Santiago Sandoval Gutiérrez³

^{1,3}Universidad de los Llanos, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Macrypt, Sistemas Dinámicos, Colombia,
ajimenez@unillanos.edu.co, ssandoval@unillanos.edu.co

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, I2E, Colombia, fabian.jimenez02@uptc.edu.co

Resumen— El manejo del recurso hídrico en la agricultura es importante para prevenir pérdidas de rendimiento y aplicar los recursos de la manera más adecuada. Uno de los mecanismos de prescripción de riego es la determinación temprana, en el lugar adecuado, del estrés hídrico de las plantas en un cultivo, permitiendo de esta manera dirigir riegos de precisión. Los sensores infrarrojos permiten medir la temperatura de la cubierta vegetal, reflejando la relación entre la radiación, transpiración y el estado hídrico de las plantas. En este documento se presentan los avances del diseño e implementación de un prototipo de sistema de adquisición de datos con dispositivos electrónicos para la determinación del estrés hídrico de las plantas en un cultivo agrícola, basado en la medición de la temperatura de las hojas. El sistema permite la adquisición de datos y su envío a una estación central, para el seguimiento y en la siguiente etapa del proyecto definir prescripciones de riego mediante un modelo de aprendizaje profundo LSTM. Los avances evidencian la aplicabilidad del sistema desarrollado en la gestión del riego en cultivos agrícolas.

Palabras clave— Agua, agricultura, dosel, prescripción, riego de precisión.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego automatizados permiten la flexibilidad de aplicación de agua de manera precisa, además de manejar la variabilidad espacial en el campo [1]. Estos sistemas están disponibles comercialmente y su filosofía es suministrar agua a las plantas en donde sea necesario, cuando el cultivo lo requiera y en las cantidades apropiadas. La cantidad de riego que se distribuirá en el campo puede determinarse por medio de tecnología. Existen diversos sensores utilizados para medir parámetros útiles para la aplicación de riego agrícola, divididos fundamentalmente en sensores de la planta, el suelo y el ambiente [2].

Dentro de los sensores esenciales para medir parámetros del ambiente, las estaciones meteorológicas son los instrumentos más usados [3]. Utilizan la medición de diversas variables ambientales como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y radiación, calculando la evapotranspiración. La evapotranspiración del cultivo es la cantidad de agua que se pierde en un periodo de tiempo correspondiente a la transpiración del cultivo y la evaporación sobre las hojas y el suelo. Este parámetro junto con el coeficiente de cultivo es vital para la determinación del uso consuntivo de agua en los cultivos tecnificados [4]. Su dificultad más relevante es que es una

medición puntual y no representa en escala adecuada la variabilidad que hay en un campo real.

El segundo grupo corresponde a los sensores de humedad del suelo. Algunos tipos de sensores son los resistivos y los capacitivos [5], los basados en medición de frecuencia [6], del tiempo [7] y las sondas de neutrones [8]. Su aplicabilidad está siendo extensiva en sistemas productivos tecnificados, en donde es posible instalar sensores en el campo de acuerdo a la variabilidad del terreno o los ensayos de riego que se deseen hacer.

Por otro lado, se encuentran los sensores cuyo enfoque es centrado en la planta (*plant-centric*, en inglés) [9]. Estos sensores adquieren su información directamente sobre la planta. Dentro de estas tecnologías están los sensores de flujo de savia [10], los dendrómetros [11] y los sensores de medición de la temperatura de las plantas [12]. Estos sensores también pueden instalarse en distintas partes del cultivo de acuerdo a las zonas de manejo determinadas por características del suelo, variedades y microclimas dentro de los lotes.

La temperatura de las hojas en las plantas es la respuesta de la radiación neta o energía entrante, restándole las pérdidas por convección y evapotranspiración. Cuando le hace falta el agua, la planta cierra sus estomas, disminuyendo la transpiración y aumentando la temperatura de las hojas [13]. Debido a esto, la temperatura de las hojas es un indicador del estado hídrico de las plantas. La temperatura de las hojas se puede medir con sensores o cámaras infrarrojas instaladas en sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, *Remotely Piloted Aircraft System*, en inglés) [14], satélites [15], torres, instaladas en campo o sobre los sistemas móviles de riego para medir la temperatura de la superficie del dosel (T_c) [16]. Al comparar T_c con la temperatura del aire y usando diferentes procedimientos se detecta el estrés hídrico en el instante adecuado, permitiendo de esta forma prescribir riego y validar los resultados obtenidos con otros sensores como los de suelo, dendrómetros o de flujo de savia.

El uso de sensores de temperatura de las hojas ofrece la medición no invasiva del cultivo y facilidades de remoción al final de la cosecha, en comparación de los sensores de humedad del suelo. Al ser usados remotamente permiten mapear heterogeneidades y priorizar intervenciones, según condiciones sitio-específicas en campo. La implementación de sensores infrarrojos exige el uso de calibraciones radiométricas, horas especiales de adquisición de la información y el uso de datos meteorológicos según la plataforma de adquisición de datos [17].

Existen diversos procedimientos para determinar el estrés hídrico en las plantas, incluyendo el umbral de temperatura temporal (TTT, *Time, Temperatura Threshold*, en inglés) y los índices de estrés hídrico. El TTT es un procedimiento en el que se mide la temperatura de las hojas continuamente; cuando la temperatura sobrepasa un umbral específico de acuerdo a la especie de la planta, se comienza a medir el tiempo en que esta temperatura permanece sobre este valor. Si la temperatura sobrepasa un umbral de tiempo también específico, la planta se considera estresada y es tiempo de regar [18].

Dentro de las ecuaciones de determinación de estrés hídrico se encuentran el Índice de estrés hídrico de cultivo (*CWSI, Crop Water Stress Index*, en inglés) (1). Este índice normaliza la diferencia entre la temperatura de la superficie de las hojas y el aire, usando un límite superior y uno inferior. Estos valores superiores e inferiores se deben determinar mediante el modelamiento teórico o experimentación [19].

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{inferior}}{(T_c - T_a)_{superior} - (T_c - T_a)_{inferior}} \quad (1)$$

Donde T_c es la temperatura de la superficie de las hojas, T_a la temperatura del aire, $(T_c - T_a)_{inferior}$ es el límite sin estrés (inferior) y $(T_c - T_a)_{superiores}$ el límite de estrés máximo (superior).

Otro índice conocido es el índice de verdor térmico (GI, *Greenness Index*) (2), el cual mezcla el índice de vegetación normalizado (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) (3), con la medición de la temperatura para la detección del estrés [20].

$$GI = \frac{T_c}{NDVI} \quad (2)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Donde *NIR* es el valor de la reflectancia de la superficie en el espectro del infrarrojo y *RED* la correspondiente al rojo.

Además, se conoce el índice de transpiración relativa (RTI, *Relative Transpiration Index*) (4), que utiliza la temperatura del dosel para indicar la tasa de transpiración indirectamente [21].

$$RTI = \frac{T_{húmedo} - T_c}{T_{húmedo} - T_{seco}} \quad (4)$$

Donde $T_{húmedo}$ corresponde a la temperatura de una superficie en saturación y T_{seco} es la de una superficie seca de referencia.

Se ha evidenciado que los rendimientos y eficiencias en el uso del agua en la producción agrícola usando los sensores de temperatura presentan similitud o son mejores que la respuesta en rendimiento obtenida con sensores costosos de medición del contenido volumétrico del agua como la sonda de neutrones [22]. Con la integración de las redes de sensores, la inteligencia artificial y la programación en la nube permitirían la generación de medidas de estrés hídrico y sus relaciones con la cantidad de agua a aplicar. Esto permitiría la generación de prescripciones

de riego para sistemas estáticos como los de riego por goteo y por aspersión o para sistemas dinámicos como los riegos por pivote central o desplazamiento lateral. En este artículo se muestran los avances en el desarrollo de un sistema inteligente basado en sensores infrarrojos para la detección de estrés hídrico y la futura prescripción automatizada de riego. Se evidencia el diseño e implementación de la red de sensores IoT para medir temperatura del dosel, la transmisión y almacenamiento de datos en una plataforma en la nube y la evaluación de la viabilidad técnica del sistema en campo.

Posteriormente a los resultados mostrados en este documento, se continuará con la siguiente fase de la investigación, correspondiente a la implementación de modelos de inferencia basados en *CWSI* y *TTT*, además del uso de redes neuronales Long Short-Term Memory (LSTM). Este sistema se genera como una plataforma tecnológica útil para el estudio y definición de parámetros de estrés hídrico y valores de índices y cálculos útiles para la prescripción de riego, además de ser una herramienta para agrónomos y productores interesados en el riego de precisión y el manejo del recurso hídrico en cultivos agrícolas. Las contribuciones de esta investigación consistieron en el diseño de la arquitectura IoT para monitoreo de temperatura del dosel, la implementación de nodos sensores autónomos de bajo costo, la integración de tecnologías de comunicación XBee y LoRaWAN, además del desarrollo del sistema de adquisición y visualización en tiempo real.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se está desarrollando en la Universidad de los Llanos sede Barcelona, ubicada en las afueras de la ciudad de Villavicencio – Meta, Colombia. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), esta región del departamento se caracteriza por tener una temperatura promedio entre 20°C - 32°C y una precipitación anual promedio de 4383 mm.

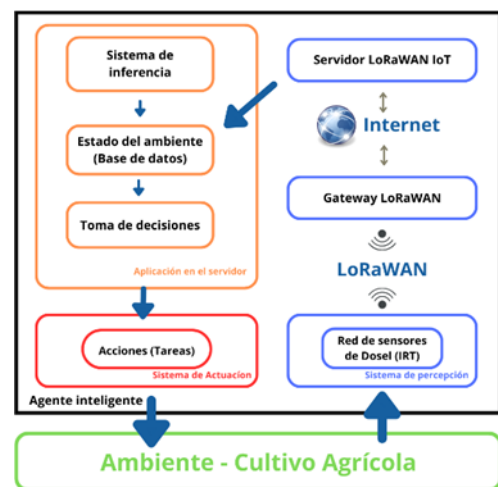


Fig. 1 Arquitectura del agente inteligente IRT.

El diseño general del sistema se fundamentó en el concepto de un agente inteligente reactivo basado en modelos. Este sistema está inmerso en un entorno o ambiente, que para este caso es el cultivo agrícola. El agente está constituido por los sistemas de percepción, inferencia y actuación, con transmisión de datos a un servidor IoT para la visualización y monitoreo. El sistema de adquisición de datos basado en los sensores de temperatura del dosel envía la información recopilada inalámbricamente a un servidor web. En el servidor se desarrolla la aplicación que permite el almacenamiento de los datos recopilados, establecer el sistema de inferencia y de toma de decisiones. Posteriormente se ejecutan tareas en el campo que son asociadas con la aplicación del riego (Fig 1).

El propósito de este documento es mostrar los avances en la implementación del sistema de adquisición de datos en campo mediante los sensores de temperatura del dosel. En trabajos futuros se continuará con el trabajo investigativo en aras de implementar los sistemas de transmisión, inferencia, toma de decisiones y aplicación del recurso hídrico en campo según las prescripciones definidas por el agente inteligente, implementando los algoritmos de CWSI y TTT para determinar el estrés hídrico y el momento de aplicación del riego.

El sistema de percepción está compuesto de una red de nodos que están equipados con sensores infrarrojos de temperatura, los cuales se distribuyen dentro del cultivo. La red de sensores implementada garantizará la adquisición, el envío y el almacenamiento de los datos de todos los sensores en la estación central (Fig 2).

Los nodos de sensores del sistema de percepción fueron diseñados con dispositivos de bajo costo y fácil acceso en el mercado colombiano. Cada nodo sensor está equipado con un sensor infrarrojo de temperatura GY-906-DCI, dos baterías de litio 18650 de 3.7V, dos paneles solares de 5W cada uno, y un regulador de potencia para la alimentación del sistema y carga de las baterías (Figura 3). Con esta implementación se asegura un suministro de energía adecuado en ambientes abiertos.

El sistema de procesamiento de datos parte de un microcontrolador Arduino Nano el cual se encarga de recolectar y transmitir los datos de temperatura del cultivo mediante un radiotransmisor XBee Pro SB3 a la estación central, formada por una Raspberry Pi® Zero W (Raspberry Pi Foundation). Posteriormente, la estación central envía los datos a través de un módulo LA66 LoRaWAN™ (Dragino Technology Development Co. LTD). Este puede alcanzar distancias de hasta 20 km, dependiendo del tipo de antena que tenga equipado. Este módulo opera con un voltaje de entre 1.8V y 3.7V, y su rango de frecuencia varía entre 150 MHz y 960 MHz. Luego el módulo transmite la información a un Gateway LoRaWAN™ - LPS8-v2 (Dragino Technology Development Co. LTD), desde donde el usuario puede definir los intervalos de transmisión de datos. Finalmente, los datos son enviados a un Servidor LoRaWAN™ IOT y son accesibles a través de una aplicación web, permitiendo su visualización en dispositivos

con conexión a Internet.

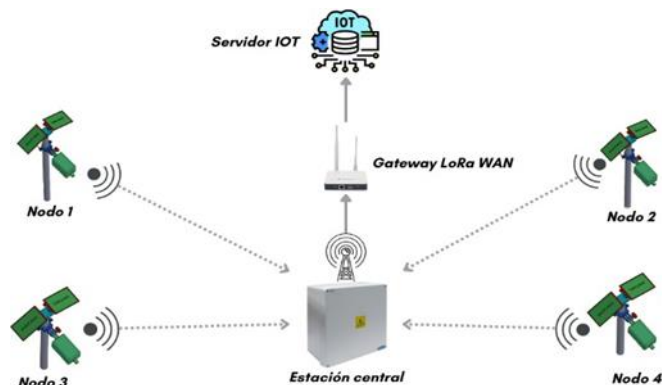


Fig. 2 Red de nodos sensores.

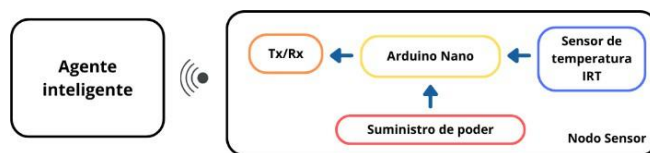


Fig. 3 Arquitectura del nodo sensor IRT.

III. RESULTADOS

La Figura 4 presenta el diagrama que ilustra los componentes electrónicos de un nodo sensor IRT, que son fundamentales para la recopilación de datos en el campo.

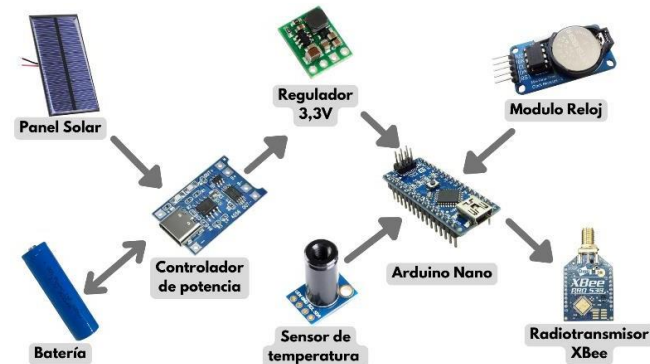


Fig. 4 Componentes de un nodo sensor IRT.

Se realizó un diseño preliminar en el software SOLIDWORKS versión estudiantil de la estructura física que tendrían los nodos sensores para su respectiva instalación en campo, teniendo en cuenta la movilidad que debe tener el sensor al orientarlo para una correcta medición (Fig 5).

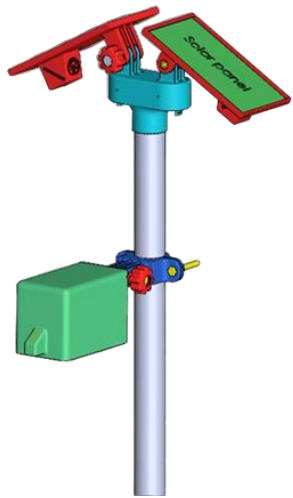


Fig. 5 Diseño estructural de un nodo sensor IRT.

Al diseño del nodo sensor se le añadió un módulo reloj DS3231 de alta precisión para determinar el momento exacto en el que fue capturado el valor de la temperatura. Posteriormente se diseñó una placa de circuito impreso y se realizó el montaje de todos los componentes del nodo sensor (Fig. 6).

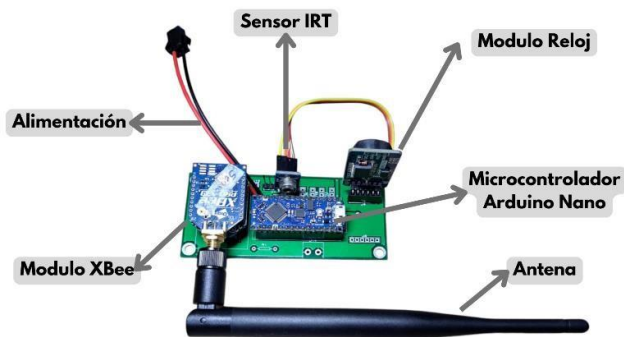


Fig. 6 Montaje de un nodo sensor IRT.

Se realizaron pruebas con el nodo sensor IRT enviando los datos capturados a la plataforma en línea basada en la nube *ThingSpeak*, permitiendo almacenar y monitorear datos en tiempo real de los dispositivos conectados en campo (Fig 7).

En la Figura 8 se muestran los datos recopilados por un sensor instalado en campo durante el mes de agosto de 2025. Estos datos corresponden a una frecuencia de muestreo de 15 minutos, que puede configurarse según requerimientos del usuario. La señal de T_{can} (roja), correspondiente a la temperatura del dosel o canopia, muestra un comportamiento altamente periódico diurno, típico de cultivos bajo radiación solar, con un incremento progresivo en la mañana y picos entre 30 y 34°C al medio día. Se evidencia también un descenso nocturno hasta valores entre 20 y 24 °C. Este comportamiento indica una respuesta a la radiación solar y al enfriamiento por transpiración durante el día. En horas de mayor estrés se

establece la reducción de la apertura estomática y una menor disipación de calor.

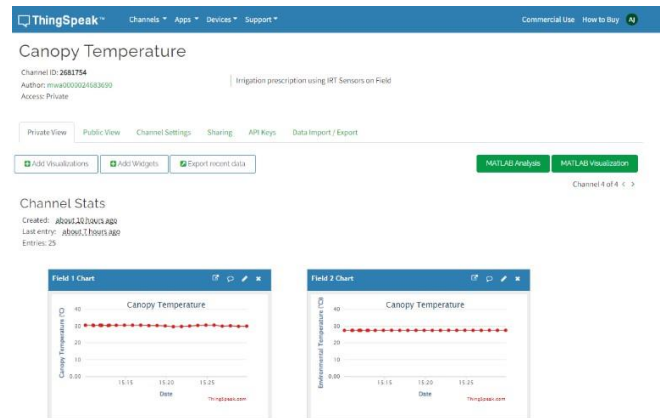


Fig. 7 Interfaz Gráfica de visualización de datos ThingSpeak.

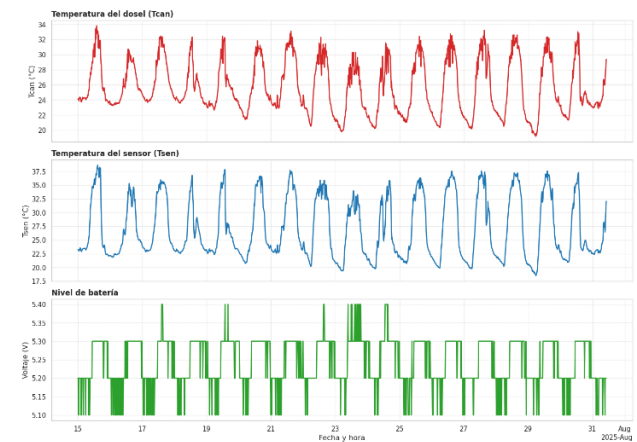


Fig. 8 Datos adquiridos en prueba de campo.

Cuando existan tiempos prolongados de temperaturas sobre umbrales, definidos según la literatura, es posible establecer las condiciones de alta demanda evaporativa, que determinarán un estrés hídrico puntual. El sensor de temperatura ambiente T_{sen} (azul), está oscilando entre 18 °C y 38 °C, presentando valores mayores con respecto a T_{can} , respondiendo también a la radiación solar. Al ser T_{sen} mayor que T_{can} indica que le dosel está enfriando la superficie foliar por transpiración, representando un estado hídrico adecuado. T_{sen} sube más rápido que T_{can} lo que indica una amortiguación térmica del dosel y el cultivo entonces estará funcionando como regulador térmico. La diferencia en ambas señales T_{sen} y T_{can} indican su potencialidad para el cálculo de los índices de estrés hídrico. En el caso estudiado, del seguimiento de las variables en el lote de estudio en un cultivo de maíz, muestra un comportamiento típico sin estrés, debido a que se aplicaron riegos conforme al balance hídrico. Se pueden asociar los parámetros estudiados, junto con otros sensores para el entrenamiento futuro de modelos LSTM.

Finalmente, el voltaje de batería (verde) muestra valores

entre 5.10 V y 5.40 V, con variaciones periódicas pequeñas, lo cual indica que el sistema de batería y panel solar permiten una alimentación estable, en donde se establece una compensación de consumo, sin descargas mayores a las adecuadas para el funcionamiento correcto del sistema.

IV. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada por los grupos de investigación Macrypt, semillero FarmTechnology y Sistemas Dinámicos 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 inteligente de detección de estrés hídrico en plantas mediante sensores térmicos sobre el dosel, con código: C07-02-2026-028. También se agradece a Luis D. Sánchez Rincón, por sus aportes en el desarrollo de este trabajo.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio presentan un enfoque integral para el manejo automático del riego, basado en tecnologías de medición de temperatura de las hojas utilizando sensores infrarrojos (IRT). La arquitectura del sistema es robusta y adecuada para la recolección de datos en campo.

El sistema propuesto incluye especificaciones técnicas para la adquisición de datos y el diseño general de los componentes de la red de sensores. Se ha logrado establecer los elementos fundamentales de la adquisición y transmisión de datos. Posteriormente se desarrollará el aplicativo Web más robusto y visualmente amigable para el usuario, además de desarrollar e implementar los modelos de inferencia para la definición del riego en los cultivos agrícolas monitoreados.

Se deben instalar los sensores en campo de acuerdo al cultivo específico, recopilar datos y establecer los parámetros correctos para calcular las prescripciones de riego en el lugar específico de aplicación. Posteriormente se evaluará el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de campo y establecer los requerimientos para su escalabilidad.

REFERENCIAS

- [1] Ray, S., & Majumder, S. (2024). Water management in agriculture: Innovations for efficient irrigation. *Modern agronomy*, 169-185.
- [2] Jimenez, A. F., Cardenas, P. F., Canales, A., Jimenez, F., & Portacio, A. (2020). A survey on intelligent agents and multi-agents for irrigation scheduling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, 105474.
- [3] Narayana, T. L., Venkatesh, C., Kiran, A., Kumar, A., Khan, S. B., Almusharraf, A., & Quasim, M. T. (2024). Advances in real time smart monitoring of environmental parameters using IoT and sensors. *Heliyon*, 10(7).
- [4] Wanniarachchi, S., & Sarukkalige, R. (2022). A review on evapotranspiration estimation in agricultural water management: Past, present, and future. *Hydrology*, 9(7), 123.
- [5] Teixeira, J., & Correia dos Santos, R. (2021). Exploring the applicability of low-cost capacitive and resistive water content sensors on compacted soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4), 2969-2983.
- [6] De Vos, B., Cools, N., Verstraeten, A., & Neirynck, J. (2021). Accurate Measurements of Forest Soil Water Content Using FDR Sensors Require Empirical In Situ (Re) Calibration. *Applied Sciences*, 11(24), 11620.
- [7] Moret-Fernández, D., Lera, F., Latorre, B., Tormo, J., & Revilla, J. (2022). Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity. *Catena*, 218, 106540.
- [8] Francke, T., Heistermann, M., Köhli, M., Budach, C., Schrön, M., & Oswald, S. E. (2022). Assessing the feasibility of a directional cosmic-ray neutron sensing sensor for estimating soil moisture. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11(1), 75-92.
- [9] Zhang, J., Guan, K., Peng, B., Pan, M., Zhou, W., Grant, R. F., ... & Wu, G. (2021). Assessing different plant-centric water stress metrics for irrigation efficacy using soil-plant-atmosphere-continuum simulation. *Water Resources Research*, 57(9), e2021WR030211.
- [10] Zhang, R., Chai, Y., Liang, X., Liu, X., Wang, X., & Hu, Z. (2024). A New Plant-Wearable Sap Flow Sensor Reveals the Dynamic Water Distribution during Watermelon Fruit Development. *Horticulturae*, 10(6), 649.
- [11] Waldburger, T., Anken, T., Cockburn, M., Walter, A., Hatt, M., Chiang, C., & Nasser, H. R. (2025). Automated irrigation of apple trees based on dendrometer sensors. *Agricultural Water Management*, 311, 109398.
- [12] Stutsel, B., Johansen, K., Malbêteau, Y. M., & McCabe, M. F. (2021). Detecting plant stress using thermal and optical imagery from an unoccupied aerial vehicle. *Frontiers in plant science*, 12, 734944. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.779145>
- [13] Morales-Santos, A., & Nolz, R. (2023). Assessment of canopy temperature-based water stress indices for irrigated and rainfed soybeans under subhumid conditions. *Agricultural Water Management*, 279, 108214. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108223>
- [14] Lacerda, L. N., Snider, J. L., Cohen, Y., Liakos, V., Gobbo, S., & Vellidis, G. (2022). Using UAV-based thermal imagery to detect crop water status variability in cotton. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107371>
- [15] Ihuma, S. O., Madramootoo, C. A., & Kalacska, M. (2021). Integration of satellite imagery and in situ soil moisture data for estimating irrigation water requirements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102396. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106399>
- [16] Colaizzi, P. D., O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., & Mounce, R. B. (2017). Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. *Agricultural Water Management*, 187, 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.019>
- [17] Tolomio, M., & Casa, R. (2020). Dynamic crop models and remote sensing irrigation decision support systems: A review of water stress concepts for improved estimation of water requirements. *Remote Sensing*, 12(23), 3945. <https://doi.org/10.3390/rs12071157>
- [18] Yang, Z., Tian, J., Ouyang, Z., Chen, H., & Yan, X. (2025). Measurement of irrigation management based on canopy-air temperature modeling for corn and wheat crops. *Plant and Soil*, 1-21.
- [19] Mohamed, N. E., Mustafa, A. R. A., Bedawy, I. M., Ahmed, A. S., Abdelsamie, E. A., Mohamed, E. S., ... & Shokr, M. S. (2024). Utilizing Infrared Thermometry to Assess the Crop Water Stress Index of Wheat Genotypes in Arid Regions under Varying Irrigation Regimes. *Agronomy*, 14(8), 1814.
- [20] Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaei, H., & Mehraban, A. (2023). Improving the water use efficiency, greenness index, and wheat grain yield under various irrigation regions using biofertilizer.
- [21] Tuccio, L., Piccolo, E. L., Battelli, R., Matteoli, S., Massai, R., Scalabrelli, G., & Remorini, D. (2019). Physiological indicators to assess water status in potted grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Scientia Horticulturae*, 255, 8-13.
- [22] Ndlovu, H. S., Odindi, J., Sibanda, M., & Mutanga, O. (2024). A systematic review on the application of UAV-based thermal remote sensing for assessing and monitoring crop water status in crop farming systems. *International Journal of Remote Sensing*, 45(15), 4923-4960.