

Implementación de control en sistema de fertirriego para invernadero hidropónico

CESAR GERARDO PARRA, JUAN D. PADILLA R., DAVID E. CASTRO P., JULIO C. PICOS P., JESÚS J. ROCHIN M., GUILLERMO J. RUBIO A.*

Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán, Sinaloa, México.

*Autor de Correspondencia: guillermo.ra@culiacan.tecnm.mx

RESUMEN En esta investigación se implementa un controlador lógico difuso en un sistema de fertirriego por goteo para un invernadero hidropónico de pimiento (*Capsicum annuum* L.), se compara el desempeño con el método tradicional de evapotranspiración. Durante dos periodos de 22 y 31 días, se evalúa la tasa de crecimiento del cultivo y el consumo hídrico. Los resultados muestran que el controlador difuso logra un ahorro hídrico del 69.72% para el primer periodo y 74.94% para el segundo periodo, sin comprometer el crecimiento del cultivo. Como resultado, el uso de algoritmos de control inteligente que se aplican en la agricultura puede mejorar la eficiencia hídrica.

PALABRAS CLAVE— Fertirriego, Control, Humedad.

I. INTRODUCCIÓN

En México y el mundo, la agricultura consume la mayor cantidad de agua. En el país, el 76% se destina al riego, pero cerca del 50% se desperdicia por riego excesivo y falta de mantenimiento, por esto, es necesario aprovechar de manera eficiente el agua para el riego y contribuir al desarrollo sostenible del sector primario [1].

El cambio climático y la sobrepoblación [2], han incrementado la escasez de alimentos y recurso hídrico [3]. A consecuencia, se tiene un problema respecto al uso y manejo del agua. Debido a esto, satisfacer el requerimiento hídrico y nutricional para un cultivo es una tarea fundamental en la agricultura, y se puede lograr gracias a la tecnificación de los sistemas de riego, además, de tener un ahorro hídrico, mayores ganancias y un aumento en la producción [4].

El uso de la agricultura protegida proporciona un cuidado y una mejora para los cultivos ante el cambio climático. Estas estructuras proporcionan diversas opciones para crear las condiciones ambientales adecuadas [5]. También la agricultura protegida tiene beneficios, como lo son, el ahorro hídrico, generación de empleos, disponibilidad de alimentos, productos de mayor calidad, la oportunidad de cultivar fuera de temporada [6].

La humedad de suelo es una variable importante para los cultivos, el incorporar la tecnificación para mantener la humedad adecuada del suelo en un sistema de riego, logra reducir el consumo del recurso hídrico [7], además de aumentar la producción [8]. Muchos de los sistemas de riego tecnificados se basan en controlar la evapotranspiración. Sin embargo, es posible realizar una mejora en el sistema al tener un algoritmo de control clásico aplicado en la humedad del

suelo para el sistema de riego al tener un ahorro hídrico y energético mayor al 40% [9].

Se ha demostrado que los algoritmos de control inteligente han beneficiado a la agricultura [10], como lo es la lógica difusa, al mejorar los sistemas de riego tecnificados [11], comparado con sistemas tradicionales, puede obtener un ahorro hídrico del 18% como se demuestra [12]. De igual manera, utilizar un controlador inteligente puede mejorar la producción [13] y el crecimiento de un cultivo en comparación con un sistema no controlado [14]. También es posible utilizar estos controladores en invernaderos para controlar variables físicas como la temperatura [15] y humedad relativa [16].

En esta investigación, se implementa un controlador lógico difuso para un sistema de fertirriego por goteo en un invernadero hidropónico en un cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.). En el cual se controla la humedad del sustrato, además, se compara durante 22 y 31 días con una anterior implementación con el método de evapotranspiración. Estos métodos se evalúan con base al consumo hídrico y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) [17]. Las mediciones se hicieron en 12 plantas separadas en macetas en los experimentos.

El presente trabajo se desarrolla en IV secciones, en la sección II se presenta el diseño en software del invernadero hidropónico a escala piloto, los componentes necesarios para el sistema de fertirriego, la composición química de la solución nutritiva, la instrumentación de sensores y los métodos implementados al sistema de fertirriego. La sección III presenta el resultado de la implementación durante 22 y 31 días, una evaluación, comparación de los métodos implementados y discusión. Por último, en la sección IV, se presenta la conclusión del trabajo.

II. DESARROLLO

A. DISEÑO

Para la implementación del controlador inteligente y el método de evapotranspiración para el sistema de fertirriego, primero, se realiza mediante el software gráfico SketchUp, el diseño del sistema de fertirriego donde, en la Fig. 1 se muestra el exterior del invernadero. En la Fig. 2 se puede observar la numeración y el acomodo de las macetas dentro del invernadero, siendo 12 las macetas instaladas junto con las líneas de riego y en la Fig. 3 se muestra una válvula para regular el flujo de la solución nutritiva, un sensor de caudal para medir el volumen suministrado y la bomba del sistema.

Una vez que se realiza el diseño, se selecciona un controlador para la implementación, este proyecto utiliza un controlador lógico programable (PLC) modelo DVP-SX2, el cual solo puede ser programado en lenguaje escalera (Ladder). Para la instrumentación del invernadero se utilizan diferentes sensores y actuadores, en la Tabla I se muestran estos elementos del sistema de fertirriego.

B. INSTRUMENTACIÓN DE SENSORES

Para la instrumentación de los sensores del sistema de riego, se utilizan dos diferentes. El primer sensor que se utiliza fue el YF-S201, utilizado para medir el caudal tiene un rango de error de ± 10 pulsos o un 5% de error en la medición, según lo indicado en su hoja de especificaciones técnicas. Su alimentación es de 5 VCD, debido a esto fue necesario realizar un circuito para escalar el voltaje a 24 VCD que requieren las entradas del PLC. Por medio de un transistor TIP41 la señal del sensor de caudal se conmuta a una alimentación de 24 VCD para ser leída por las entradas digitales del controlador, el diseño del circuito se muestra en la Fig. 4.

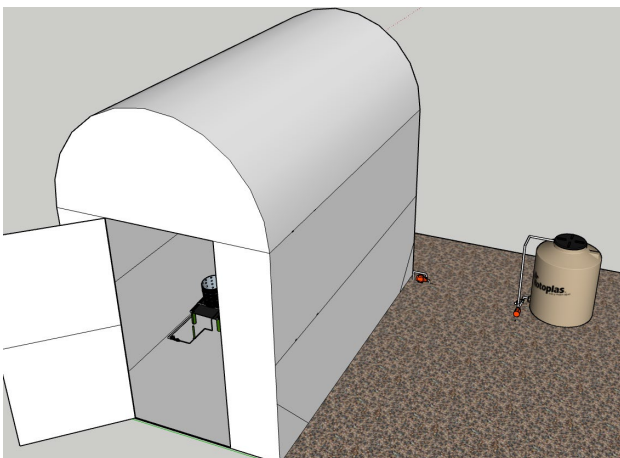


Fig. 1. Exterior del invernadero.

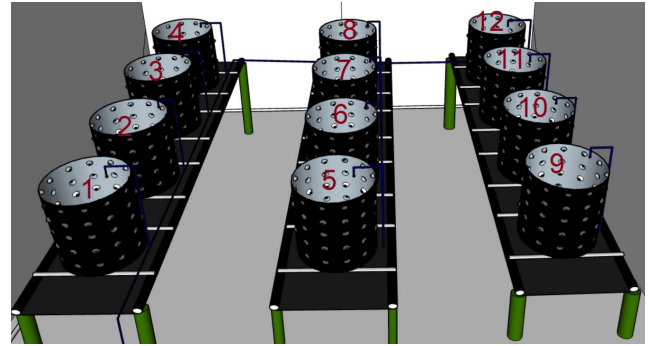


Fig. 2. Numeración y acomodo de las macetas.

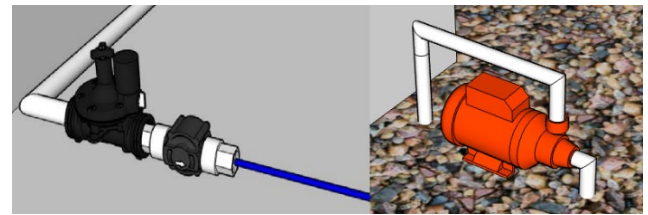


Fig. 3. Electroválvula, sensor de caudal y bomba de riego.

TABLA I. COMPONENTES DEL SISTEMA DE FERTIRRIEGO.

Componente	Cantidad	Características
Sensor YF-S201	1	Sensor de efecto Hall
Sensor de humedad de suelo	1	Sonda con resistencia analógica
Transistor TIP41	1	Transistor NPN de potencia
Electroválvula de 1"	1	Electroválvula de dos posiciones
Válvula proporcional de ½"	1	Válvula con servomotor regulable
Bomba eléctrica de ½ HP	1	Bomba de 127 VCA

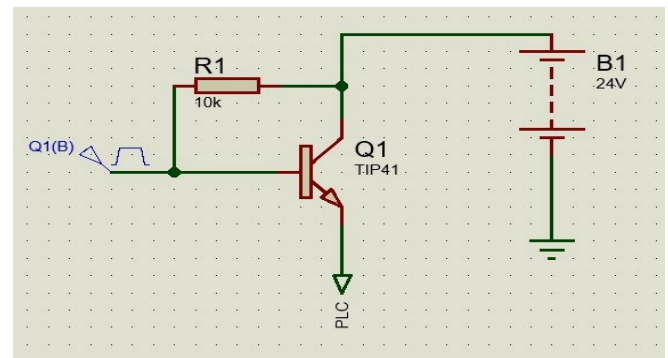


Fig. 4. Circuito de conmutación de señal del sensor de caudal.

Una vez realizada la conexión es necesario calibrar el sensor, es necesario obtener el factor de conversión (K), para ello se hizo un conjunto de mediciones, la Tabla II muestra las mediciones realizadas al sensor. En la parte derecha de la tabla se muestra la columna del factor de conversión, esta constante se calcula para cada medición, para ello se utiliza la Ec. (1).

TABLA II. EXPERIMENTO PARA CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE CAUDAL.

Medición	Volumen (litros)	Pulsos	Factor de conversión
1	4.40	2066	7,83
2	6.40	2796	7,28
3	7.85	3153	6,69
4	10.73	4176	6,49
5	14.43	5551	6,41
6	0.85	296	5,78
7	1.17	421	5,99
8	1.50	586	6,50
9	1.67	632	6,30
10	2.01	765	6,35
11	2.42	911	6,27
12	2.68	1017	6,31
13	3.11	1152	6,16

$$K = \frac{n}{V \cdot 60} \quad (1)$$

Donde, K es el factor de conversión, n el número de pulsos y V el volumen en litros.

Con los resultados que se obtienen se calcula el factor promedio, en este caso es de 6.49. Al obtener el valor K es posible obtener el valor de V al despejar de la Ec. (1), como resultado se tiene la Ec. (2), donde el volumen es la variable deseada:

$$V = \frac{n}{K \cdot 60} \quad (2)$$

Una vez calibrado el sensor de caudal, se procedió con el sensor de humedad de suelo, en este caso al ser un invernadero hidropónico se utiliza un sustrato. El sensor al tener un funcionamiento con base al voltaje es necesario al menos dos mediciones, una medición en sustrato seco o 0% de humedad y otra medición del sustrato saturado, es decir, un 100% de humedad.

Estas mediciones se realizan en el PLC, el cual recibe un voltaje en su entrada analógica dentro de un rango de 0 a 10 VCD, escalado en valores de 0 a 2000 unidades. Este voltaje se normaliza y escala para representar los niveles de humedad, esto se observa en la Tabla III.

TABLA III. VALORES ESCALADOS DEL SENSOR DE HUMEDAD.

Medición del PLC	Voltaje (mV)	Humedad (%)
815	407.5	0
300	150	100

C. MÉTODO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para la implementación del sistema de fertirriego mediante el método de evapotranspiración no se utiliza ningún algoritmo de control, para esto se estima el volumen de irrigación diario durante 5 semanas, gracias a la estimación y el uso del sensor de caudal, se automatiza el tiempo que encendió la bomba en dos riegos al día, esto para otorgar el volumen aproximado de solución nutritiva calculado y evitar encharcamiento, la Tabla IV muestra las estimaciones hídricas y el tiempo para el encendido de la bomba respectivamente. Los riegos de la implementación se programan mediante una pantalla HMI por sus siglas en inglés “Human-Machine Interface”, en la Fig. 5, se observa la programación.

D. MÉTODO DE CONTROL DE HUMEDAD

El método de control de humedad basado en lógica difusa se programa en un PLC, con los conjuntos de entrada A0 a A9 mostrados en la Fig. 6. De igual manera, para la Fig. 7 se presentan los conjuntos de salida, los cuales van de B0 hasta B9 y los valores establecidos para la entrada y la salida se programan mediante la pantalla HMI como se muestra en la Fig. 8, la salida analógica del PLC está escalada en un rango de 0 a 1000, donde 0 representa una apertura del 0% y 1000 equivale a una apertura completa del 100%. Para la Tabla V se aprecian las nomenclaturas de los conjuntos difusos que muestran las funciones de entrada y salida. Las abreviaturas como HMBB, HB y HMB representan los nombres de las funciones de pertenencia. Por último, se establecen las reglas de las funciones de membresía como en [18] y se pueden observar en la Tabla VI.

TABLA IV. ESTIMACIONES HÍDRICAS Y TIEMPOS DE RIEGO ESTABLECIDOS.

Semana	ET _o mm/día	ET _c mm/día	Volumen L/día	Tiempo total de riego	Tiempo por riego
1	4.60	2.76	8.4	02:54	01:27
2	4.64	2.78	8.52	02:56	01:28
3	4.65	2.79	8.52	02:56	01:28
4	4.81	2.89	8.88	03:04	01:32
5	4.91	2.95	9	03:06	01:33

ET_o: Evapotranspiración de referencia, ET_c: Evapotranspiración de cultivo.



CONFIGURACIÓN DE RIEGO

ENCENDIDO DE RIEGO MATUTINO

INVERNADERO AUTOMATIZADO

HORA DE INICIO: 9

MINUTOS Y SEGUNDOS DESDE: 1 0

MINUTOS Y SEGUNDOS HASTA: 2 27

ENCENDIDO DE RIEGO VESPERTINO

INVERNADERO AUTOMATIZADO

HORA DE INICIO: 15

MINUTOS Y SEGUNDOS DESDE: 1 0

MINUTOS Y SEGUNDOS HASTA: 2 27

RECIRCULAMIENTO

HORA DE INICIO: 8

MINUTO INICIAL Y FINAL: 40 59

Fig. 5. Programación de los horarios de riego.

TABLA V. NOMENCLATURA DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS.

Abreviatura	Significado
HMBB	Humedad-Muy-Baja-Baja
HB	Humedad-Baja
HMB	Humedad-Media-Baja
HM	Humedad-Media
HMA	Humedad-Media-Alta
HAB	Humedad-Alta-Baja
HAM	Humedad-Alta-Media
HA	Humedad-Alta
HMAA	Humedad-Muy-Alta-Alta
AN	Apertura-Nula
AMP	Apertura-Muy-Pequeña
AP	Apertura-Pequeña
AMB	Apertura-Media-Baja
AM	Apertura-Media
AMA	Apertura-Media-Alta
AAB	Apertura-Alta-Baja
AAM	Apertura-Alta-Media
AAA	Apertura-Alta-Alta

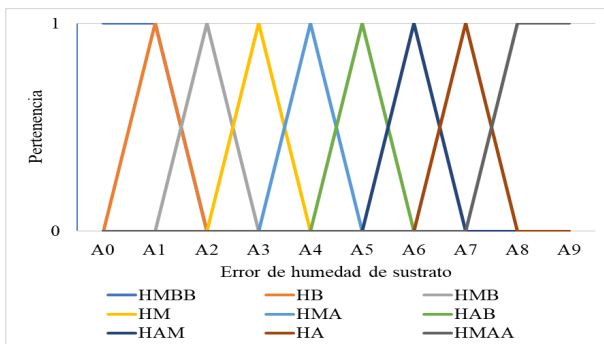


Fig. 6. Funciones de membresía para los conjuntos de entrada.

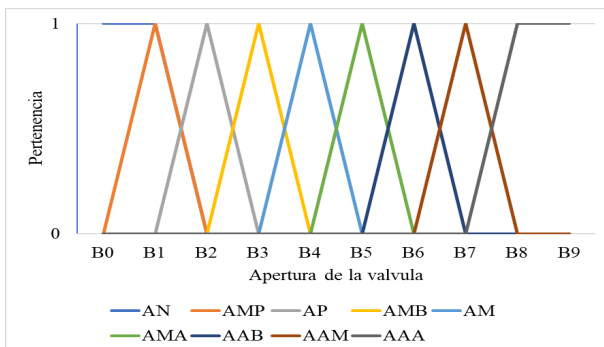


Fig. 7. Funciones de membresía para los conjuntos de salida.

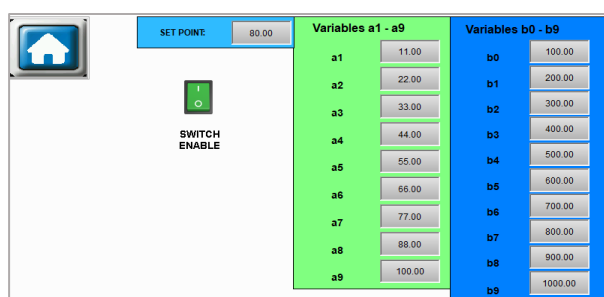


Fig. 8. Programación de las funciones de membresía de entrada y salida.

TABLA VI. REGLAS DE CONTROL PARA EL FERTIRRIEGO.

Estado de la humedad de sustrato	Apertura de la válvula
HMBB	AN
HB	AMP
HMB	AP
HM	AMB
HMA	AM
HAB	AMA
HAM	AAB
HA	AAM
HMAA	AAA

III. RESULTADOS

En este proyecto se implementan dos metodologías para la aplicación de fertirriego por goteo hidropónico: evapotranspiración y control de humedad para sustrato. Estas metodologías fueron aplicadas en cultivos de pimiento (*Capsicum annuum L.*), donde se evalúa la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), cuyo cálculo se muestra en la Ec. (3) y permite obtener el crecimiento promedio diario. Se mide la longitud del tallo de 12 plántulas durante 22 y 31 días, como se muestra en la Fig. 9. El proceso se lleva a cabo para ambas metodologías y también se evalúa el consumo de fertirriego.

$$TCC = \frac{L_2 - L_1}{T} \quad (3)$$

Donde, L_2 es la longitud final de la planta, L_1 la longitud inicial de la planta y T el tiempo de implementación.

A. IMPLEMENTACIÓN DE 22 DÍAS

Se obtienen las mediciones de todas las plantas al finalizar la implementación. La Fig. 10 muestra la dinámica de crecimiento con evapotranspiración, donde la planta 10 obtiene el mejor crecimiento y la planta 3 el menor, con una TCC promedio de 1.369 mm/día. En la Fig. 11 se presentan los resultados del método de control, donde la planta 10 resulta con un mayor crecimiento y la planta 4 el menor crecimiento. La TCC promedio fue de 1.2 mm por día.



Fig. 9. Medición del cultivo.

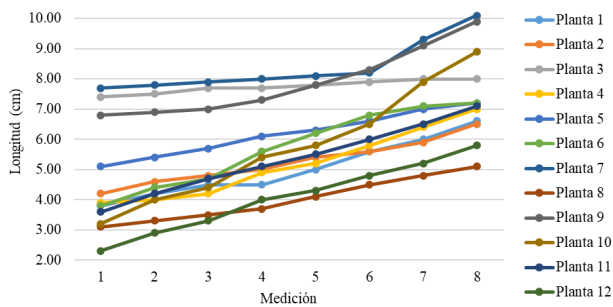


Fig. 10. Longitud de plantas con el método evapotranspiración en 22 días.

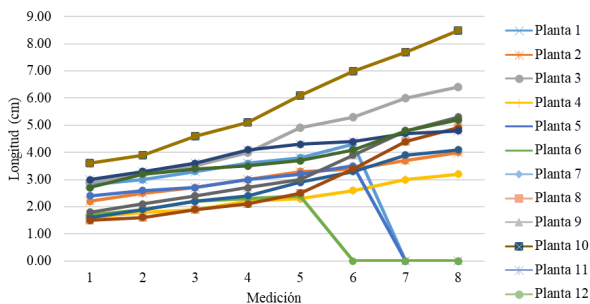


Fig. 11. Longitud de plantas con el método de control en 22 días.

También se evalúa el consumo de fertirriego, que registra un total de 213.25 litros de solución nutritiva en el método de evapotranspiración, mientras que el método de control requiere solo 64.57 litros de solución nutritiva, como se ilustra en la Fig. 12 y la Fig. 13, respectivamente.

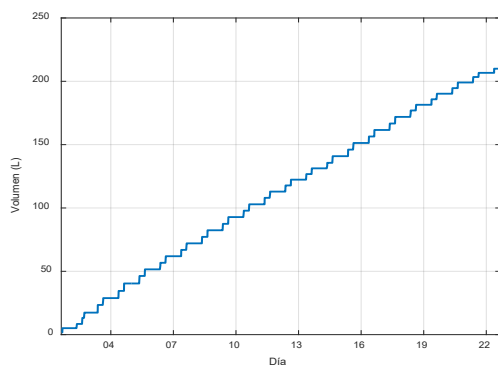


Fig. 12. Consumo de fertirriego con método evapotranspiración en 22 días.

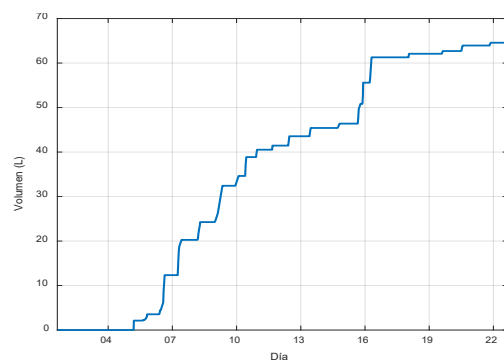


Fig. 13. Consumo de fertirriego con método de control en 22 días.

B. IMPLEMENTACIÓN DE 31 DÍAS

Al finalizar la segunda implementación, se toman de nuevo las mediciones de las plantas. En la Fig. 14 se muestra la dinámica de crecimiento de los cultivos bajo el método de evapotranspiración, donde la planta 10 obtiene el mejor crecimiento y la planta 3 el menor crecimiento. La TCC promedio se determina con un valor de 1.366 mm por día.

En la Fig. 15 se presentan los resultados del método de control, donde la planta 5 resulta con un mayor crecimiento y la planta 2 el menor crecimiento. Se calcula la TCC promedio de 1.387 mm por día.

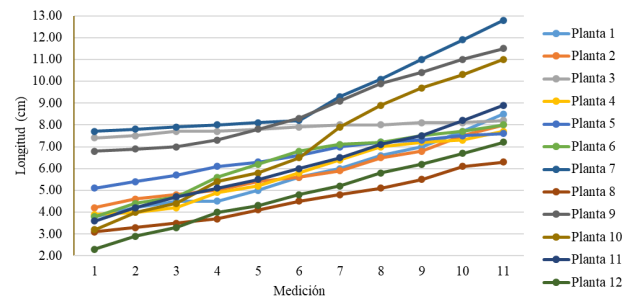


Fig. 14. Longitud de plantas con el método evapotranspiración en 31 días.

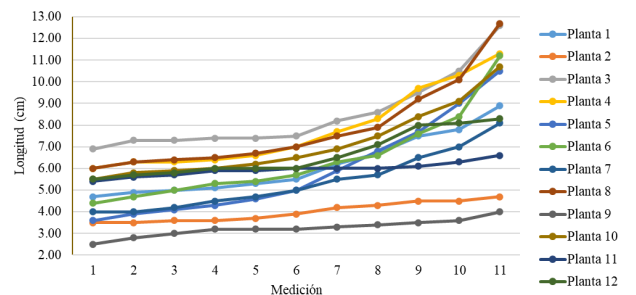


Fig. 15. Longitud de plantas con el método control en 31 días.

Al igual que en la implementación anterior, se evalúa el consumo de fertirriego. En total, el método de evapotranspiración utiliza 271.92 litros de solución nutritiva y el método de control consume solo 68.13 litros, como se ilustra en la Fig. 16 y la Fig. 17, respectivamente.

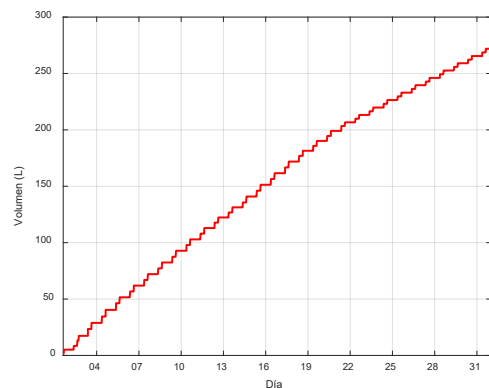


Fig. 16. Consumo de fertirriego con método evapotranspiración en 31 días.

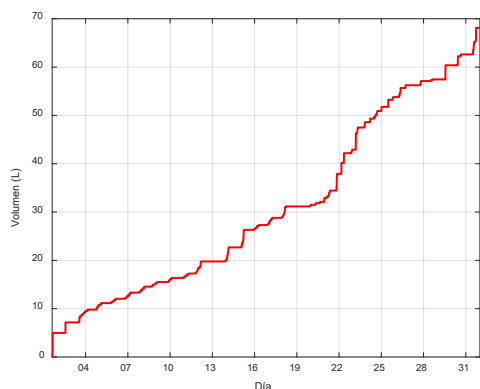


Fig. 17. Consumo de fertirriego con método de control en 31 días.

C. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS

En este proyecto, se comparan un controlador que se basa en lógica difusa y el método de evapotranspiración, ambos se aplican a un sistema de fertirriego durante 22 y 31 días. En la [Tabla VII](#) se presentan los resultados de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y el consumo de solución nutritiva para los métodos que se implementan. En cuanto al ahorro hídrico, el método de control logra una reducción del 69.72% en la implementación de 22 días, mientras que en la implementación de 31 días el ahorro alcanza el 74.94%. Este valor representa una mejora significativa en la eficiencia del uso del recurso hídrico. En la comparación de la TCC, durante los 22 días de implementación, las plantas del método de evapotranspiración crecieron un 14.08% más. En la implementación de 31 días, el método de control favorece al crecimiento en un 1.54% sobre el método de evapotranspiración.

Los resultados presentados en las [Figs. 10 y 17](#) muestran las diferencias clave entre los métodos evaluados. En particular, el método basado en evapotranspiración mantiene un enfoque estático para el riego, suministrando cantidades predeterminadas de agua dos veces al día. En contraste, el controlador difuso ajusta dinámicamente el flujo de riego según la humedad del sustrato, lo que permite un uso más eficiente del recurso hídrico.

La comparación en la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) revela una ligera ventaja para el método de evapotranspiración en los primeros 22 días. Sin embargo, en el periodo extendido de 31 días, el controlador difuso permitió un crecimiento superior. Esto sugiere que la capacidad del sistema difuso para adaptar el riego a las condiciones del cultivo favorece su desarrollo a largo plazo.

TABLA VII. EVUALUACIÓN DE LOS MÉTODOS IMPLEMENTADOS.

Evaluaciones	Evapotranspiración	Control
TCC 22 días	1.369 mm	1.2 mm
TCC 31 días	1.366 mm	1.387 mm
Volumen 22 días	213.25 L	64.57 L
Volumen 31 días	271.92 L	68.13 L

D. DISCUSIÓN

En esta investigación se realiza la implementación de un sistema de fertirriego en invernadero hidropónico, que a diferencia de lo presentado por [10] y [16] se implementa en un invernadero a escala piloto, además, considera la variable de humedad de suelo para su control. También en comparación a lo implementado por [9], [12] y [13], se obtiene un mejor ahorro en el consumo hídrico. En este caso el ahorro para un periodo 31 días fue del 74.94%. A diferencia de las implementaciones mencionadas, se utiliza un controlador lógico programable (PLC) y una pantalla HMI.

El controlador difuso ofrece mayor precisión al regular el caudal de manera continua en función de la humedad del sustrato comparado con un control On-Off. Los resultados obtenidos en este trabajo evidencian que el uso de controladores inteligentes, como la lógica difusa, representa una alternativa para optimizar el uso del agua en sistemas agrícolas. En particular, el controlador difuso logró una reducción significativa del 69.72% en el consumo de agua durante el periodo de 22 días, y del 74.94% en 31 días, en comparación con el método de evapotranspiración.

Adicional a esto, aunque en el primer periodo (22 días) las plantas bajo el método de evapotranspiración mostraron un crecimiento 14.08% mayor, el método de control difuso no solo alcanzó un crecimiento equivalente, sino que, al cabo de 31 días, logró superar por un 1.54% el crecimiento del método tradicional. Estos resultados resaltan la capacidad del controlador difuso para proporcionar un riego más eficiente sin comprometer el rendimiento del cultivo, contribuyendo al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles.

IV. CONCLUSIONES

El controlador lógico difuso demuestra ser una alternativa eficiente en el fertirriego de pimiento (*Capsicum annuum* L.), al lograr un ahorro hídrico significativo de hasta 74.94%. Además, superar el crecimiento al compararse con el método de evapotranspiración, especialmente en periodos más prolongados.

El controlador difuso tiene potencial para aplicaciones en otros cultivos y sistemas agrícolas, especialmente en aquellos complejos o no lineales. Su flexibilidad lo hace adecuado para invernaderos y agricultura protegida. Sin embargo, el estudio carece de comparación con otros controladores tradicionales o inteligentes.

El sistema de riego con controlador difuso contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir el consumo de agua hasta un 74.94%. También mejora la sostenibilidad económica al optimizar costos y aumentar rendimientos. Este enfoque se alinea con el Programa Nacional Hídrico 2020-2024 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo una agricultura eficiente y sostenible.

Como trabajo futuro, se sugiere integrar controladores como PID o redes neuronales para comparar su desempeño con la lógica difusa. También sería útil extender la experimentación a ciclos completos de cultivo y validar resultados en otras especies, contribuyendo al desarrollo sostenible al optimizar recursos y garantizar productividad en condiciones de escasez hídrica.

REFERENCIAS

- [1] SEMARNAT, "Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional Hídrico 2020-2024," 2020. [Online]. Available: https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/pnh/PNH_2020_2024.pdf
- [2] INEGI, "Estadísticas a propósito del día mundial de la población," Jul. 2023. [Online]. Available: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_DMPO23.pdf
- [3] FAO, El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023. FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO; 2023. doi: 10.4060/cc3017es.
- [4] Olvera-Salgado et al., "La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. Estudio de caso en Chihuahua, México," Ambiente Y Desarrollo, vol. 18, no. 35, pp. 23–36, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.AyD18-35.trea>.
- [5] L. E. Barreto-Salazar et al., "Evaluation of Serrano Pepper Crops Growth under Controlled Conditions of Vapor Pressure Deficit in a Pilot-Scale Hydroponic Greenhouse," Processes, vol. 11, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/pr11123408.
- [6] SADER, "Tipos de estructura para la agricultura protegida," Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/agricultura-protegida-otramanera-de-cultivar>
- [7] Patroo et al., "A Smart Precision Irrigation and Monitoring System," in Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer Verlag, 2019, pp. 105–114. doi: 10.1007/978-3-030-18240-3_10.
- [8] León Mejía et al., "Efecto del riego deficitario controlado en el cultivo de pimiento (Capsicum annum L.) Utilizando la tina de evaporación clase a, en Río Verde, Santa Elena, Ecuador," Revista Ciencia e Investigación, vol. 5, no. 1, pp. 114–124, 2020, doi: 10.5281/zenodo.3599163.
- [9] Rivai et al., "Drip Irrigation System using BLDC Motor-driven Direct Pumping and Soil Moisture Sensor," ICOMITEE, pp. 221–226, Oct. 2019, doi: 10.1109/ICOMITEE.2019.8921024.
- [10] Vázquez Rueda et al., "Redes neuronales aplicadas al control de riego usando instrumentación y análisis de imágenes para un micro-invernadero aplicado al cultivo de Albahaca," Research in Computing Science, vol. 147, no. 5, pp. 93–103, May 2018.
- [11] Santhana Krishnan et al., "Fuzzy Logic based Smart Irrigation System using Internet of Things," J Clean Prod, vol. 252, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119902.
- [12] Souza et al., "A fuzzy irrigation control system," in 2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference, GHTC 2020, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/GHTC46280.2020.9342960.
- [13] Singh et al., "Optimization of irrigation timing for sprinkler irrigation system using convolutional neural network-based mobile application for sustainable agriculture," Smart Agricultural Technology, vol. 5, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100305.
- [14] Pezol et al., "Design of an Internet of Things (IoT) Based Smart Irrigation and Fertilization System Using Fuzzy Logic for Chili Plant," Shah Alam, Malaysia.: IEEE, 2020. doi: 10.1109/I2CACIS49202.2020.9140199.
- [15] Barreto-Salazar et al., "Control of Vapor Pressure Deficit (VPD) on Black Sesame Seed (Sesamum indicum L.) Sprout Production in a Micro-Greenhouse Using Intelligent Control," Applied Sciences, vol. 11, no. 17, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11177957.
- [16] Aghaseyedabdollah et al., "IoT Based Smart Greenhouse Design with an Intelligent Supervisory Fuzzy Optimized Controller," in 2021 7th

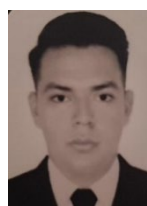
International Conference on Web Research, (ICWR), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021, pp. 311–317. doi: 10.1109/ICWR51868.2021.9443022.

- [17] R. Hunt, Basic Growth Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. doi: 10.1007/978-94-010-9117-6.
- [18] J. D. Padilla R., "Desarrollo del control de sistema de fertirriego en un invernadero hidropónico para producto primario," Tesis de Maestría, DEPI, TECNM, Culiacán Sin., 2023.

BIOGRAFÍAS



CESAR GERARDO PARRA Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2023). Actualmente cursa la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, con el tema de tesis 'Desarrollo de un algoritmo de control inteligente para sistemas de riego agrícola'.



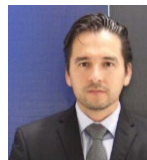
JUAN DANIEL PADILLA ROCHIN Ingeniero en Mecatrónica (2015) y Maestro en Ciencias de la Ingeniería (2023) por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán, México.



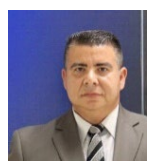
DAVID ENRIQUE CASTRO PALAZUELOS Ingeniero Electrónico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2000). Maestro en Ciencias en Telemática por la Universidad de Colima (2004) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialización en Telecomunicaciones por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara (2015). Es profesor investigador del Departamento de Eléctrica-Electrónica en el Tecnológico Nacional de México. Sus áreas de investigación incluyen procesamiento de señales en sensores remotos, procesamiento paralelo de datos, y co-diseño hardware-software para detección multimodo y sistemas de comunicación.



JULIO CESAR PICOS PONCE Ingeniero en Electrónica por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (2003). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados, IPN, Unidad Guadalajara (2005). Doctor en Ciencias en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Sinaloa, Campus Culiacán (2017). Profesor de tiempo completo del Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica en el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán. Sus intereses de investigación incluyen teoría de toma de decisiones, sistemas de control inteligente e inteligencia artificial.



JESÚS JAIME ROCHÍN MEDINA Doctor en biotecnología. Desarrolla proyectos de investigación en biotecnología y nutrición vegetal, así como en la búsqueda de compuestos de origen vegetal con actividad biológica.



GUILLERMO JAVIER RUBIO ASTORGA Ingeniero Eléctrico por el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán (1998). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2001) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (2013) por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Unidad Guadalajara. Profesor del Departamento de Eléctrica-Electrónica en el Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán. Sus áreas de investigación incluyen el control no lineal de máquinas eléctricas.