



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Desarrollo de control en sistema de fertirriego para invernadero hidropónico de pimiento (*Capsicum Annuum L.*)

Development of a fertigation control system for hydroponic micro tunnel greenhouse for pepper cultivation (*Capsicum Annuum L.*)

Gerardo-Parra, C., Padilla-Rochín, J.D., Castro-Palazuelos, D.E., Picos-Ponce, J.C., Rochín-Medina, J.J., Barreto-Salazar, L.E., Rubio-Astorga, G.J.*

Departamento Unidad de Posgrado. Tecnológico Nacional de México/ITCuliacán; C.P. 80220, Culiacán Rosales, Sinaloa. 13 de mayo de 2025.

m18170161@culiacan.tecnm.mx; m15170916@culiacan.tecnm.mx; david.cp@culiacan.tecnm.mx;
julio.pp@culiacan.tecnm.mx; jesus.rm@culiacan.tecnm.mx; luis.bs@culiacan.tecnm.mx;
guillermo.ra@culiacan.tecnm.mx*

Innovación tecnológica: Sistema de fertirriego con controlador difuso para reducir el consumo de fertirriego.

Área de aplicación industrial: La implementación de este controlador se puede realizar en campo abierto, invernaderos y sistemas hidropónicos.

Recibido: 20 mayo 2025

Aceptado: 28 octubre 2025

Abstract

One of the most widely used methods to estimate crop water requirements is the FAO Penman–Monteith evapotranspiration method. However, this method has limitations due to abrupt changes in climatic conditions. That can lead to inadequate irrigation and reduced crop productivity. This project proposes a substrate moisture control system that regulates irrigation using an intelligent control algorithm in a laboratory-scale micro-tunnel hydroponic greenhouse. The objective is to develop a fertigation control system for a hydroponic greenhouse that satisfies moisture and water consumption requirements. To achieve this, a mathematical model is established to describe the substrate moisture dynamics. Subsequently, it is evaluated using PID (Proportional–Integral–Derivative), FL (Fuzzy Logic), and NN (Neural Network) controllers. Next, the control algorithm is designed and programmed for the PLC (Programmable Logic Controller). Finally, it is implemented in a laboratory-scale micro-tunnel greenhouse, where fertigation consumption and crop growth rate are evaluated. As a result, the evapotranspiration method yielded an MSE of

19.68% and a water volume of 213.25 L. In substrate moisture control, an MSE of 3.27% and a 64.57 L water consumption were obtained. Finally, the two approaches were compared, revealing that the controlled method reduced fertigation consumption by over 60% relative to the traditional approach. The limitations of this study are the fact that the greenhouse is laboratory scale, with an area of 6 square meters, and that climatic conditions during the experiment were not favorable for optimal crop development.

Keywords: Control, Evapotranspiration, Fuzzy Logic, Moisture, PLC.

Resumen

Una de las metodologías que más se utiliza para estimar las necesidades de un cultivo, es el método de la FAO de evapotranspiración propuesto por Penman-Monteith. Sin embargo, este método presenta limitaciones debido a los cambios abruptos ante las condiciones climáticas. Estos cambios pueden provocar riegos deficientes y afectar la productividad de los cultivos. Este proyecto propone un sistema de control de humedad del sustrato, para regular el riego mediante un algoritmo de control inteligente, en un invernadero hidropónico tipo micro túnel a escala laboratorio. El objetivo es el desarrollar un sistema de control de fertirriego para invernadero hidropónico que cumpla con los requerimientos de humedad y consumo hídrico. Para ello, se establece un modelo matemático para describir la dinámica de humedad en el sustrato. Posteriormente, se evalúa con controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), LD (Lógica Difusa) y RN (Redes Neuronales). Después, se diseña y programa el algoritmo de control para el PLC (Controlador lógico programable). Finalmente, se implementa en un invernadero micro túnel a escala laboratorio. Donde, se evalúa el consumo de fertirriego y la tasa de crecimiento del cultivo. Como resultado, el método de evapotranspiración logra un ECM de 19.68% y un volumen de 213.25 L. En el control de humedad del sustrato, se obtiene un ECM de 3.27% y un consumo de 64.57 L. Por último, se comparan las dos metodologías de las cuales, el método controlado reduce más del 60% el consumo de fertirriego con respecto al método tradicional. Las limitaciones de este estudio se centran en que el invernadero es a escala laboratorio, además, cuenta con una superficie de 6 metros cuadrados y las condiciones climáticas durante el experimento no favorecen el desarrollo óptimo del cultivo.

Palabras clave: Control, Evapotranspiración, Humedad, Lógica difusa, PLC.

I. Introducción

La agricultura es una de las actividades más importantes del sector agropecuario en México. Sin embargo, consume más del 75% del agua dulce disponible en el país debido a su creciente demanda (SEMARNAT, 2020). Por ello, se busca mejorar técnicas y herramientas para satisfacer la escasez de alimentos y recursos hídricos, así como para enfrentar problemas del campo, como el

cambio climático, la erosión del suelo y la sequía (Núñez-González et al., 2019).

Una de las soluciones a estos retos es la hidroponía, un sistema de cultivo sin suelo que utiliza sustratos para anclar las plantas. Estos sustratos, al igual que la tierra, requieren un sistema de riego eficiente (Alberto et al., 2023). En este tipo de agricultura, es indispensable un sistema de

fertirriego, debido a que el sustrato es un material inerte y carece de nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas (van Os et al., 2019). Esta característica, sin embargo, presenta una ventaja: permite al productor ajustar la composición de nutrientes según las necesidades específicas del cultivo.

Los cultivos hidropónicos son muy utilizados en la actualidad, gracias a sus beneficios. Además, es posible incorporar la tecnificación en los sistemas de fertirriego, para darle al cultivo los nutrientes necesarios según su variedad (Soto-Bravo & Monge-Palma, 2023). También, es posible utilizar este tipo de técnicas agrícolas en lugares remotos, donde carecen de suministros básicos como la electricidad (Dwiratna et al., 2022).

Las metodologías tradicionales para la aplicación de sistemas de riego se basan principalmente en modelos de evapotranspiración, donde se estima el requisito hídrico que un cultivo necesita y así compensar las pérdidas de evaporación y la transpiración de las plantas (Allen et al., 1998). Este método depende de las variables climáticas como; radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (Azua Barron et al., 2020). Estas variables pueden cambiar abruptamente, afectar la precisión de los modelos y, en consecuencia, la cantidad de agua aplicada al cultivo. Una estimación inexacta puede llevar a deficiencias o excesos de riego, con impactos negativos en la productividad y la salud de las plantas (Cohen-Manrique et al., 2020).

Una de las diferencias entre la automatización y el control se considera en el uso y propósito. En este caso en la automatización se considera el accionamiento de dispositivos al seguir un tiempo o secuencia preestablecida, sin importar las condiciones del sistema

(Rodríguez-Fernández et al., 2014). Es decir, un sistema de fertirriego automatizado se puede activar sin considerar el estado de la humedad en el sustrato. En cambio, el control tiene como objetivo alcanzar un valor deseado de la variable de interés. En este caso, el controlador compara el valor medido con el deseado, y realiza ajustes para minimizar la diferencia entre ambos (error), donde se busca que este sea igual a cero (Dorf et al., 2005).

El utilizar un algoritmo de control que se aplica a la variable de humedad en el sustrato, ofrece una alternativa, al mantener la humedad adecuada en la zona radicular del cultivo. Esto previene un exceso de humedad y evita el desarrollo de enfermedades, además mejora la eficiencia en el uso del agua. Esta metodología requiere el uso de un algoritmo de control, como lo es el controlador PID, uno de los más comunes en la industria (Ogata, 2010). Su principal limitación es el uso en sistemas lineales, lo cual se supera con controladores inteligentes, capaces de adaptarse a sistemas no lineales sin requerir un modelo matemático preciso (Souza et al., 2020).

A pesar de sus beneficios, las implementaciones de controladores inteligentes en tecnologías como los controladores lógicos programables (PLC) son limitadas (Ordoñez Avila & Portillo, 2020). Sin embargo, se ha demostrado que algoritmos de control inteligente, como las redes neuronales artificiales, han tenido un impacto positivo en la agricultura (Vázquez Rueda et al., 2018). Estos algoritmos mejoran los sistemas de riego tecnificados, al lograr mayores ahorros de agua y energía en comparación con los sistemas tradicionales (Krishnan et al., 2020).

El objetivo de este proyecto es el desarrollar un controlador inteligente del sistema de fertirriego, para invernadero tipo micro túnel

que cumpla con los requerimientos de humedad del producto primario. Se implementan dos metodologías: evapotranspiración y control de humedad del sustrato. Estas se evalúan con base en la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) durante un periodo de 21 días. Las mediciones se realizan en 12 plantas distribuidas en macetas, donde se utiliza un sistema de fertirriego por goteo. Al final, se determina la TCC, se analiza el comportamiento de la humedad en el sustrato y el volumen de fertirriego aplicado para su posterior comparación.

Este trabajo, presenta en la segunda sección el diseño en SketchUp del invernadero hidropónico a escala laboratorio. Además, del modelado matemático del sistema de fertirriego, la evaluación de los controladores simulados, el diseño y simulación del

controlador difuso para el PLC y la implementación del sistema de fertirriego. En la tercera sección, se presenta implementación, para los métodos aplicados al sistema de fertirriego, así como su validación y discusión.

II. Materiales y equipos

Evaluación de modelos matemáticos

Para evaluar el modelo matemático del sistema de fertirriego, lo primero es realizar el diseño en software del sistema de fertirriego, para ello se utiliza SketchUp. Primeramente, se realiza la estructura del invernadero a escala laboratorio, donde las medidas son las siguientes: 3 metros de largo, 2 metros de ancho y una superficie de 6 metros cuadrados. En la Figura 1 se muestran las dimensiones del invernadero.

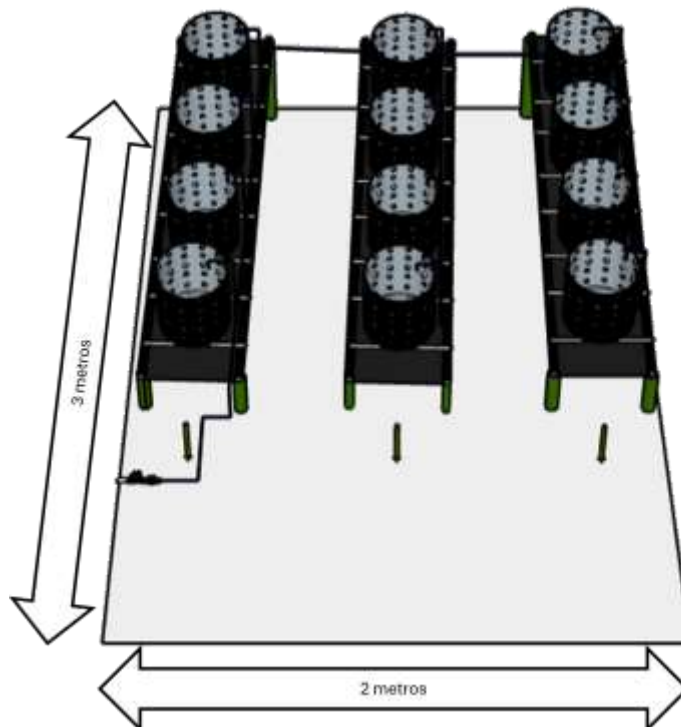


Figura 1. Dimensiones del área experimental para el invernadero escala laboratorio.

Para complementar el diseño del sistema, se selecciona un invernadero con las siguientes características: tipo micro túnel, superficie de

6 metros cuadrados, una estructura de acero y una cubierta de plástico lechoso al 25% sombra. Además, se contemplan los

siguientes materiales: un equipo de bombeo para riego, tubería para instalación eléctrica e hidráulica, sensores, macetas y un reservorio

para el fertirriego. Lo anterior mencionado se puede observar en la Figura 2.

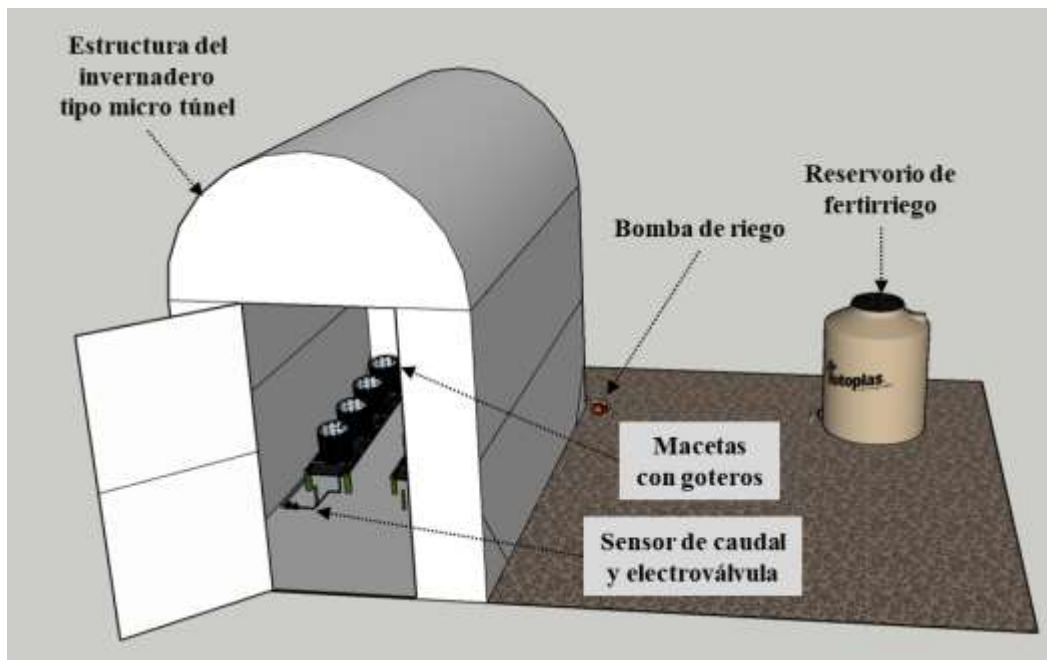


Figura 2. Diseño general del invernadero micro túnel a escala laboratorio en Sketch Up.

Posteriormente se establecen las ecuaciones del modelo matemático que describen la dinámica del comportamiento de la humedad en el sustrato con el sistema de fertirriego; en la Figura 3 se muestra cómo se ejemplifica de forma análoga la maceta en un sistema de llenado a nivel de tanque, donde Q_e y Q_s representan el caudal de entrada y salida del sistema, V_e y V_s las válvulas de entrada y salida del tanque/maceta, y H la altura del agua/sustrato dentro de la maceta/tanque.

La analogía entre la dinámica de humedad en el sustrato y el llenado de un tanque se basa en la similitud de ambos sistemas como depósitos que almacenan y liberan agua en función de la demanda. En el caso del tanque, el agua se acumula hasta alcanzar un nivel máximo y se libera mediante un mecanismo controlado. De igual manera, en el sustrato, el agua se almacena hasta llegar a la capacidad de campo y está a disposición de las plantas según sus necesidades. Esta comparación

permite utilizar técnicas de control, como las empleadas en el manejo de tanques, para gestionar la humedad en un sistema agrícola.

En este estudio se utiliza perlita como sustrato, un material inerte y poroso empleado en sistemas hidropónicos. De acuerdo con el Perlite Institute (2019), la perlita presenta una capacidad de retención de agua entre 20% y 50% del volumen, esta depende del tamaño del grano y grado de expansión. Las macetas cuentan con un diámetro de 30 cm y una profundidad de 20 cm, lo que corresponde a un volumen aproximado de 14 litros. Para estimar el comportamiento hidráulico del sustrato, se realizó una prueba preliminar de drenaje, donde se utiliza un recipiente con el mismo volumen de perlita saturada con agua, así se determina un drenaje aproximado del 23% del volumen aplicado.

Para determinar el porcentaje de humedad del sustrato, se utiliza la Ec. (1) propuesta por

Martínez-González et al. (2010), la cual se muestra a continuación:

$$\%humedad\ de\ sustrato = \frac{(masa\ de\ sustrato\ saturado - masa\ de\ sustrato\ seco)}{masa\ de\ sustrato\ seco} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Esta ecuación permite calcular el contenido gravimétrico de humedad, es decir, la masa de

agua presente en el sustrato en relación con su masa seca.

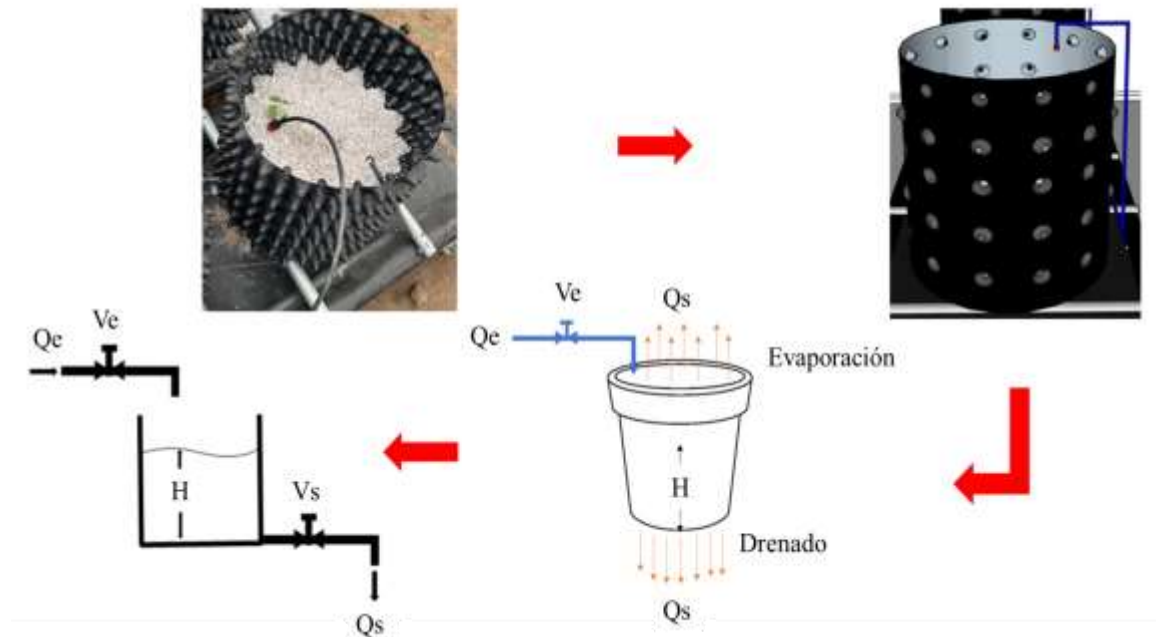


Figura 3. Analogía del comportamiento hídrico de una maceta con un sistema de nivel en tanque.

Se utiliza la Ec. (2) descrita por Merritt (1967), para describir el caudal que pasa a través de una válvula, cómo se muestra a continuación:

$$Q = C_v A(x) \sqrt{2 \Delta P / \rho} \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

Q = Caudal

C_v = Constante de descarga

$A(x)$ = Área de la sección transversal

ΔP = Diferencia de presiones

ρ = Densidad del fluido

En la Ec. (3) se plantea la ecuación general que describe los flujos equivalentes en el sistema:

$$A \frac{dh}{dt} = Q_e - Q_s \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde $Q_e = K_{v1} \alpha_1$ y $Q_s = K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2gh}$. Q_e y Q_s corresponden a los caudales de entrada y salida, respectivamente, K_{v1} y K_{v2} las constantes de flujo de las válvulas de entrada y salida, α_1 y α_2 los coeficientes de apertura de las válvulas, g la aceleración gravitacional y h la altura. Al sustituir estas expresiones en la Ec. (4), se obtiene:

$$A \frac{dh}{dt} = K_{v1} \alpha_1 - K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2gh} \quad (\text{Ec. 4})$$

Dado que la Ec. (5) incluye una raíz cuadrada, el sistema es considerado no lineal. Para obtener una función de transferencia, es necesario linealizar la ecuación. Esto se

realiza al identificar un punto de equilibrio, donde el flujo de entrada sea igual al flujo de salida:

$$K_{v1} \alpha_1 = K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2gH_0} \quad (\text{Ec. 5})$$

La Ec. (5) se resuelve para H_0 , y como resultado se tiene la Ec. (6):

$$H_0 = \left(\frac{K_{v1} \alpha_1}{K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2g}} \right)^2 \quad (\text{Ec. 6})$$

Alrededor del punto de equilibrio H_0 , La Ec. (4) se linealiza al aplicar series de Taylor, al asumir α_2 como constante. Esto lleva a la siguiente forma linealizada:

$$A \frac{d\Delta h}{dt} \approx K_{v1} \Delta \alpha_1 - \frac{K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{h}} \Delta h \quad (\text{Ec. 7})$$

Una vez se linealiza la Ec. (7), el siguiente paso es aplicar la transformada de Laplace,

donde se obtiene la función de transferencia, como se muestra en Ec. (8):

$$\frac{h(s)}{\alpha_1(s)} = \frac{K_{v1}}{As + \frac{K_{v2} \alpha_2 \sqrt{2g}}{2\sqrt{h}}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Al sustituir los valores específicos del sistema en el punto de equilibrio:

$$\frac{h(s)}{\alpha_1(s)} = \frac{0.0704}{s + 0.15} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$A = 0.071 \text{ m}^2$$

$$k_{v1} = 0.005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k_{v2} = 0.0005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h = 0.1 \text{ m}$$

Se obtiene:

Al obtener modelo matemático descrito en la Ec. (9), se evalúan los algoritmos de control PID, redes neuronales y lógica difusa.

Los valores de las constantes (K_p , K_i y K_d) de sintonización del controlador PID se obtienen mediante el comando *autotuning* de MATLAB/Simulink y se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de ganancia del controlador PID.

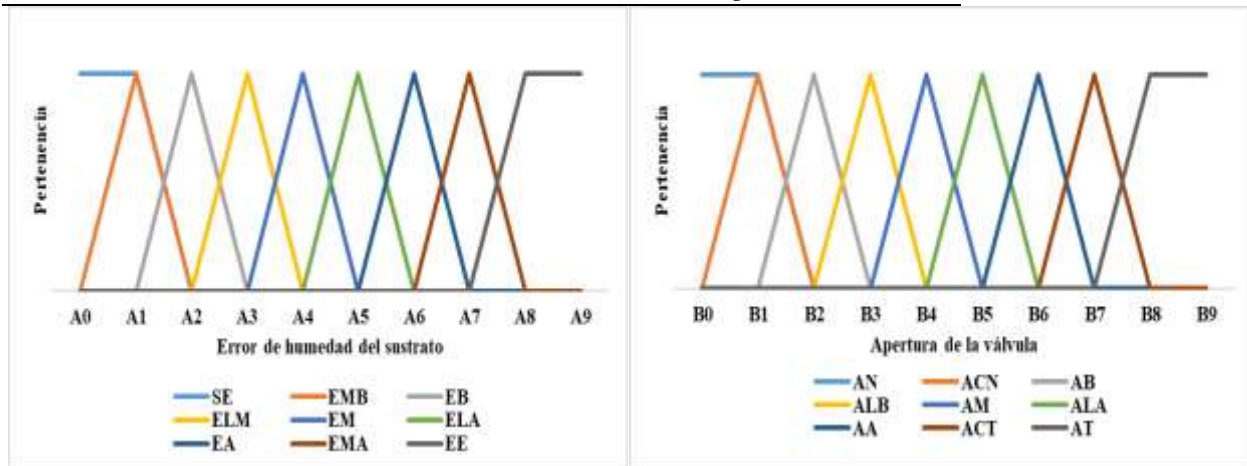
	Kp	Ki	Kd
Valor de la ganancia	0.000378525193915267	0.00767610348007699	0

En la Tabla 2 se presentan las nomenclaturas para los conjuntos difusos, donde se describen las funciones de pertenencia para la entrada y salida, junto con sus abreviaturas. La Figura 4a ilustra los conjuntos de entrada, etiquetados como A0 a A9. En la Figura 4b se

muestran los conjuntos de salida, etiquetados como B0 a B9. Finalmente, las reglas para el control de humedad se establecen y describen mediante las funciones de membresía, como se observa en el Tabla 3.

Tabla 2. Nomenclatura de los conjuntos difusos.

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
SE	Sin-Error	AN	Apertura-Nula
EMB	Error-Muy-Bajo	ACN	Apertura-Casi-Nula
EB	Error-Bajo	AB	Apertura-Baja
ELM	Error-ligeramente-Bajo	ALB	Apertura- Ligeramente-Baja
EM	Error-Medio	AM	Apertura-Media
ELA	Error-Ligeramente-Alto	ALA	Apertura-Ligeramente-Alta
EA	Error-Alto	AA	Apertura-Alta
EMA	Error-Muy-Alto	ACT	Apertura-Casi-Total
EE	Error-Extremo	AT	Apertura-Total



a) Conjuntos de entrada.

b) Conjuntos de salida.

Figura 4. Funciones de pertenencia de las variables de entrada y salida.

Tabla 3. Reglas de control para el fertirriego.

Error de la humedad del sustrato	Apertura de la válvula
SE	AN
EMB	ACN
EB	AB
ELM	ALB
EM	AM
ELA	ALA
EA	AA
EMA	ACT
EE	AT

Para este controlador es necesario obtener datos de entrenamiento, los cuales, se obtuvieron por medio del comportamiento del sistema en otros controladores y se utiliza la herramienta *Neural Network Start* de Matlab, donde se obtienen valores del error

cuadrático medio (ECM) y correlación (R) mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados del ECM y R para la RNA.

	Muestras	ECM	R
Entrenamiento	245	2.19668e-7	9.99546e-1
Validación	52	2.15500e-7	9.99407e-1
Prueba	52	1.71145e-7	9.99650e-1

La referencia que se utiliza corresponde al 75% de la humedad del sustrato. Esta evaluación se realiza en Matlab Simulink, y el diagrama de bloques del controlador se presenta en la Figura 5. Para el controlador PID, LD y RN únicamente se reemplaza el bloque correspondiente.

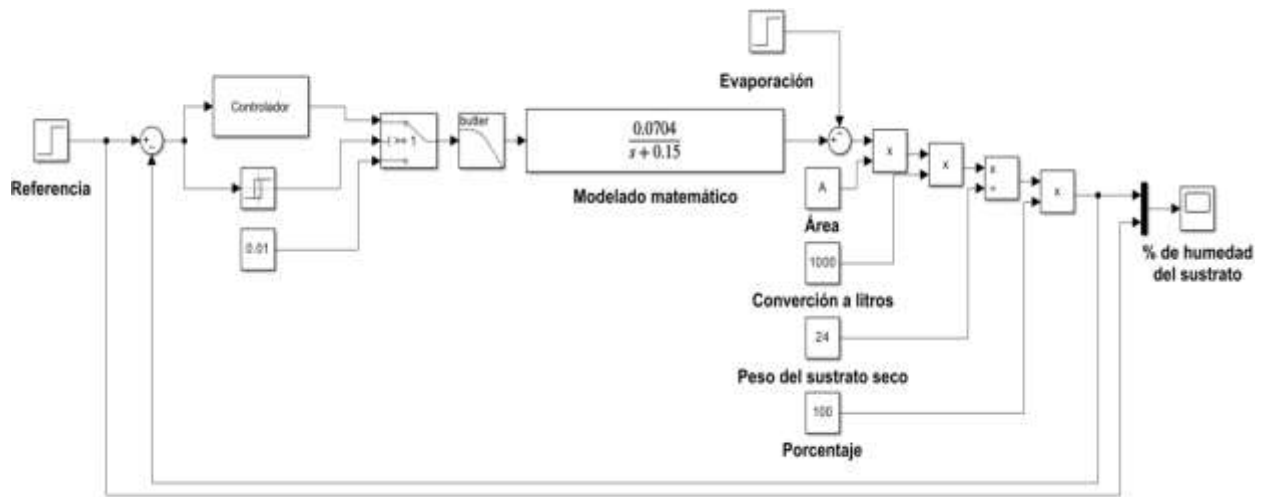


Figura 5. Diagrama de bloques del sistema a controlar.

La evaluación del controlador PID muestra que tarda 229.41 segundos en alcanzar la referencia, presenta oscilaciones debido al encendido y apagado de la bomba, con un sobre impulso del 75.3059% y un valor mínimo del 72.7961% (Figura 6).

El controlador de lógica difusa, también ilustrado en la Figura 6, alcanza la referencia en 54.8 segundos. Aunque en estado estable persisten oscilaciones similares, el sistema

presenta un sobre impulso del 75.3059% y un valor mínimo del 72.7788%.

Por último, el controlador de redes neuronales artificiales (RNA) alcanza la referencia en 115.77 segundos, con un sobre impulso del 75.5544% y un valor mínimo del 72.9215%, con oscilaciones características del encendido y apagado de la bomba, como se muestra en la Figura 6.

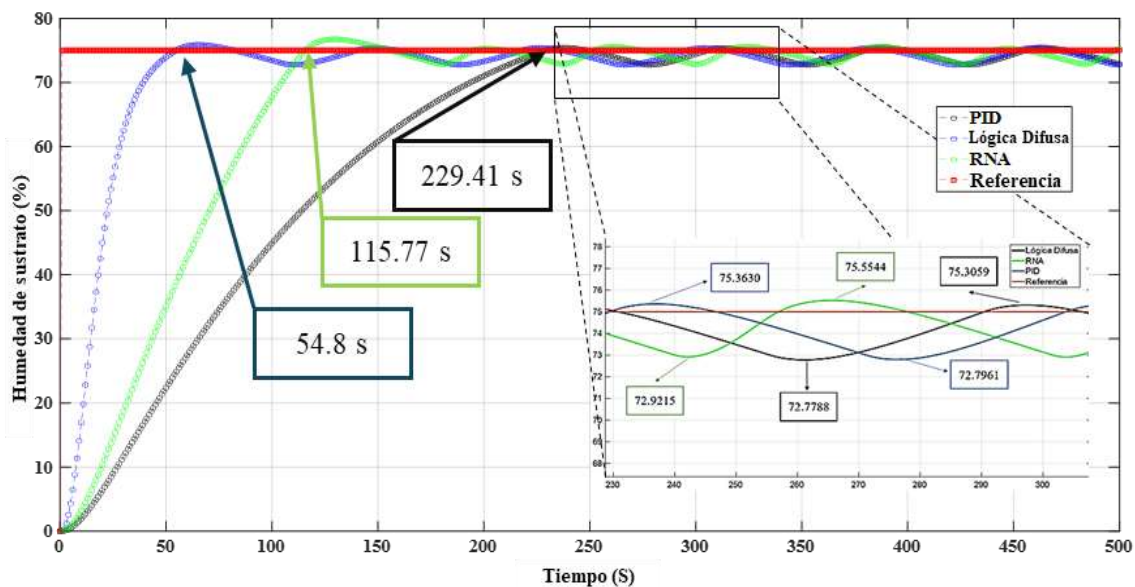


Figura 6. Comparación de los controladores PID, lógica difusa y redes neuronales artificiales.

Finalmente, en el Tabla 5 se comparan los errores de los controladores evaluados. El controlador de lógica difusa presenta el mejor desempeño, al alcanzar la referencia en menor tiempo. Además, el error negativo en estado estable es el menor, entre los tres

controladores. Pero tiene un mayor error positivo, esto resulta en períodos más largos con la bomba apagada. Por estas razones, se selecciona el controlador de lógica difusa para su implementación.

Tabla 5. Error positivo y negativo de los controladores.

Controlador	Error Negativo	Error Positivo
PID	0.3630	2.2039
Redes neuronales	0.5544	2.0785
Lógica difusa	0.3059	2.2212

Simulación del modelado

Para la simulación del modelo, el programa se enlaza con el software Factory IO, para simular el llenado del tanque y registrar los datos generados. Estos se analizan y comparan con los resultados del modelo

matemático mediante gráficas realizadas en MATLAB. En la Figura 7 se presenta la comparación de ambos resultados, donde se observa que el controlador cumple con el control de humedad en el sustrato de manera simulada, lo que valida su funcionamiento.

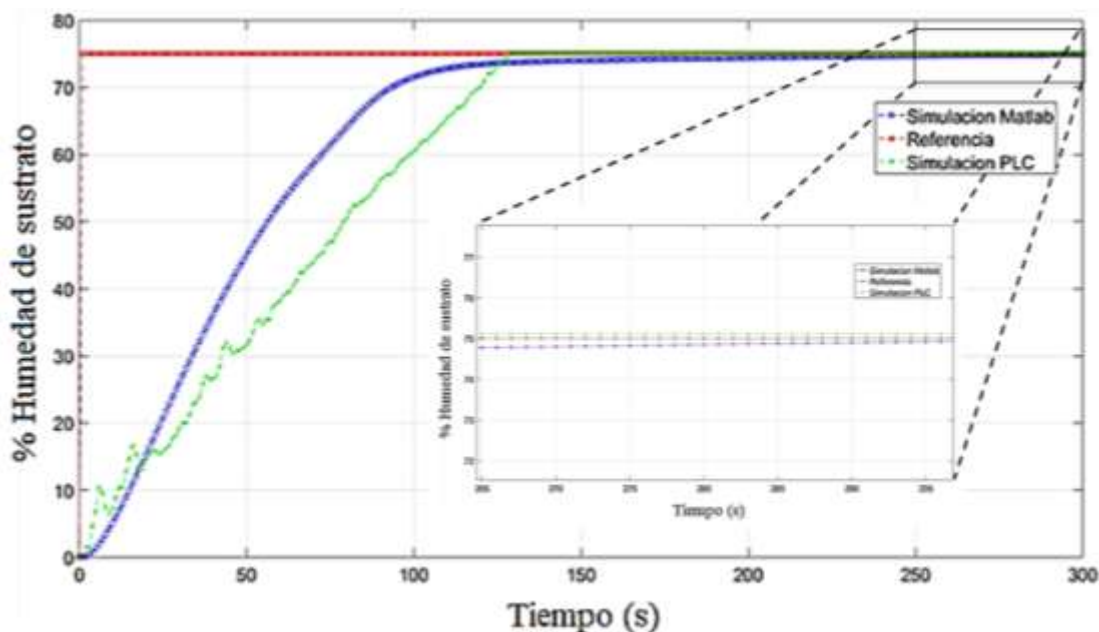


Figura 7. Comparación de la respuesta: simulación del modelo matemático y PLC.

Implementación del sistema de fertirriego

Una vez se comprueba el controlador en simulación, se realiza la implementación de este programa, para ello es necesario

instrumentar el invernadero, lo cual requiere la instalación de sensores, tuberías hidráulicas y eléctricas, cableado e instalar un tablero de control, como se muestra en Figura 8.

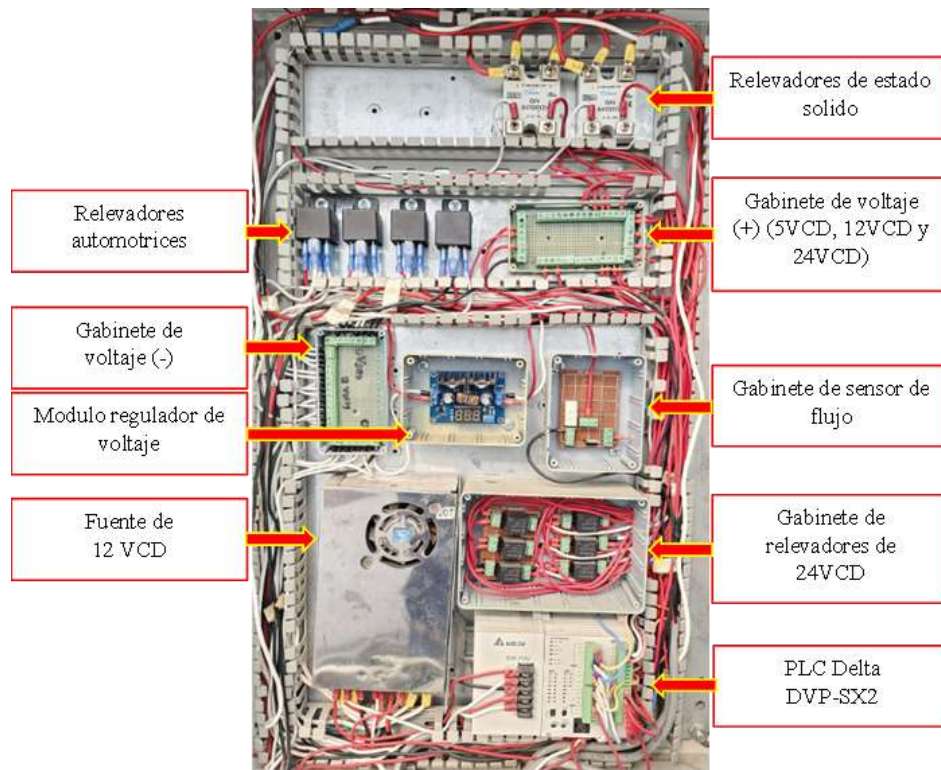


Figura 8. Disposición interna del tablero de control.

El sistema de fertirriego incluye varios componentes importantes (sensores y actuadores). Se utiliza un sensor YF-S201 de la marca Sea para medir el caudal, el cual es un sensor de efecto Hall con un rango de 1 a 30 $L \cdot \text{min}^{-1}$ y un margen de error de un 5% o ± 10 pulsos. También, dos sensores de humedad del suelo de la marca Wavgat, con sondas de resistencia analógica con una precisión de $\pm 3\%$. Para la temperatura y humedad se utiliza un sensor THD-DD2-C de la marca Autonics, cuenta con salidas analógicas de 4 a 20 mA independientes para cada variable, un rango de medición para la temperatura de -19.9 a 60.0 $^{\circ}\text{C}$, para la humedad relativa de 0.0 a 99.9 % RH. La frecuencia de muestreo para todos los sensores fue de 1 lectura por minuto. Estos datos se registran y procesan en tiempo real para alimentar los algoritmos de control implementados.

Los actuadores del invernadero son los siguientes: una bomba periférica marca

Múnich de 0.5 HP con rosca de 1" y un caudal de 42 $L \cdot \text{min}^{-1}$, una válvula electromagnética de 1" de dos posiciones, y una electroválvula proporcional marca HSH-Flo de $\frac{1}{2}$ " con servomotor, con posiciones ajustables en un rango de 0 a 5 VDC.

En la implementación del sistema de fertirriego se utiliza un PLC de la marca Delta modelo DVP-SX2. Este dispositivo no cuenta con una función integrada para control difuso, lo que hizo necesario programar manualmente las ecuaciones del controlador en lenguaje Ladder.

Además, debido a que los PLC Delta del modelo DVP-SX2 no soportan programación en SCL, se realiza la implementación en lenguaje escalera (Ladder) para garantizar la funcionalidad del sistema. Además, se diseña una interfaz gráfica en una HMI de la marca Delta, que permite supervisar y controlar cada una de las metodologías de fertirriego utilizadas en el proyecto.

La Figura 9a muestra una interfaz gráfica en HMI para la programación del riego con el método FAO (evapotranspiración), mientras que en la Figura 9b, se tiene la pantalla donde se establecen los valores para la entrada y la

salida de los conjuntos difusos del controlador. Se escalan los valores de la a salida analógica en el PLC en un rango de 0 a 1000, al rango de 0 a 100 % para la apertura de la válvula proporcional.



a) Horarios de riego del método de evapotranspiración. b) Funciones de membresía de entrada y salida.

Figura 9. Programación del sistema de fertirriego.

III. Métodos experimentales

Diseño del algoritmo de control difuso para el controlador

Una vez que se selecciona el controlador, se procede al diseño de la programación que define las operaciones establecidas por el algoritmo de control. Para ello, se desarrolla un controlador difuso adaptado a la dinámica del sistema. El proceso de lógica difusa comienza con la fuzzificación, donde se

asignan valores a las variables lingüísticas al utilizar ecuaciones que representan las funciones de membresía. Estas ecuaciones se derivan de las rectas que forman triángulos en un plano. Las funciones de membresía se describen en la Ec. (10), correspondiente al error, es decir, la diferencia entre el valor deseado y el medido. De forma general, las funciones de membresía tienen una estructura común, como se muestra en la Figura 10 y se representa así:

$$\text{Función de membresía} = \begin{cases} 0, & A < a_1 \text{ o } A > a_n \\ \frac{A - a_i}{a_{i+1} - a_i}, & a_i \leq A \leq a_{i+1} \\ \frac{a_{i+2} - A}{a_{i+2} - a_{i+1}}, & a_{i+1} \leq A \leq a_{i+2} \end{cases} \quad (\text{Ec. 10})$$

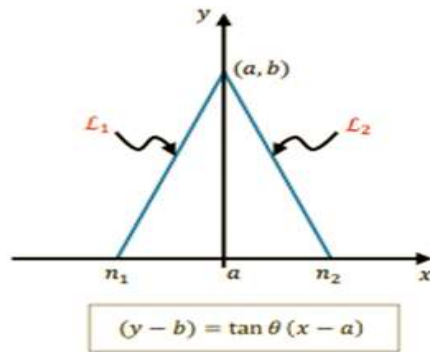


Figura 10. Función de membresía común.

Con las funciones de membresía definidas, se implementan las reglas de inferencia que relacionan las entradas con las salidas. Estas reglas están resumidas en la Tabla 3. La inferencia se basa en el valor de pertenencia que se calcula para las funciones de entrada, y se aplica como altura en las funciones de salida. En términos de programación, esto implica asignar de manera directa, el valor de las ecuaciones de entrada al conjunto de salida correspondiente.

Para la parte de la defuzzificación y obtener el valor final, se utiliza el método del cálculo de centroides, como se describe en Beer et al. (2007). Los centroides se calculan al separar las áreas en formas geométricas simples, como triángulos y rectángulos.

La Ec. (11) determina el área de un trapecio:

$$A = \frac{(b_1 + b_2) h}{2} \quad (\text{Ec. 11})$$

Por otro lado, el cálculo de la base superior, necesaria para determinar el centroide, se realiza con la Ec. (12):

$$x = B + \frac{h_1}{h_2} (A - B) \quad (\text{Ec. 12})$$

Validación de control

Finalmente, se mide de manera diaria la longitud de 12 plantas de Chile Serrano, para

$$\begin{aligned} \text{Para: } L_1 \\ (y - b) &= \frac{b}{a - n_1} (x - a) \\ y &= \frac{b(x - n_1)}{a - n_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para: } L_2 \\ (y - b) &= \frac{-b}{n_2 - a} (x - a) \\ y &= \frac{b(n_2 - x)}{n_2 - a} \end{aligned}$$

calcular la tasa de crecimiento del cultivo de la etapa vegetativa durante 21 días después del trasplante (el trasplante se realiza 40 días después de la siembra); en paralelo, se mide el consumo de fertirriego durante todo el experimento a través de un sensor de caudal. Este procedimiento se realiza para el método de evapotranspiración y el control de humedad del sustrato.

Es importante señalar que este estudio no incorpora plantas testigos ni se realizan ajustes por diferencias en biomasa. Ambos sistemas se evalúan bajo las mismas condiciones ambientales y de cultivo. En la Figura 11 se muestra la disposición e instalación de las macetas con sus respectivas líneas de riego y goteros.

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Culiacán, Sinaloa, México (24°48'N, 107°23'O). Se realizaron dos ensayos independientes correspondientes a los métodos evaluados. Para el método que se basa en evapotranspiración, el periodo de siembra corresponde del 1 al 21 de abril de 2023, con temperaturas máximas y mínimas de 46 °C y 14 °C, respectivamente, y una humedad relativa ambiente entre 85% y 12%. En el caso del método de control por humedad del sustrato, el periodo experimental se desarrolló del 6 al 26 de mayo de 2023,

registrándose temperaturas entre 52 °C y 18 °C y una humedad relativa entre 82% y 10%.



Figura 11. Disposición de las plantas.

Para implementar el método de evapotranspiración se utiliza la ecuación Ec.

(13). de acuerdo con la metodología FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$)

R_n = Radiación neta sobre la superficie del cultivo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$)

G = Flujo de calor del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{día}^{-1}$)

T = Temperatura media del aire a 2 m de altitud ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altitud ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión de vapor real (kPa)

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = Constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Una vez se calcula la evapotranspiración de referencia ET_o , se puede obtener la evapotranspiración del cultivo ET_c mediante la Ec. (14):

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (\text{Ec. 14})$$

Dónde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$)

K_c = Coeficiente único del cultivo

IV. Resultados y discusión

Resultados de la implementación de los sistemas de fertirriego

Durante el experimento, el consumo promedio de fertirriego es de 8.66 $\text{L} \cdot \text{día}^{-1}$ para las 12 plantas, distribuido en dos

riegos diarios durante 21 días. Con el método de evapotranspiración, el comportamiento de la humedad en el sustrato muestra rangos, entre 80% y 100%, lo que puede favorecer la generación de patógenos y representar un uso excesivo del recurso hídrico. El error cuadrático medio (ECM) fue de 19.68% en relación con la referencia de 75% (Figura 12a).

Por otro lado, al implementar el método de control de humedad en el sustrato, se ajusta una histéresis de la bomba entre 71.90% y 72.5%, para disminuir el sobre impulso ocasionado por residuos en las líneas de riego. En este caso, los valores de humedad oscilan entre 71% y 79%, con un ECM de 3.72%. La Figura 12b presenta el comportamiento de la humedad del sustrato para el método de control mediante lógica difusa.

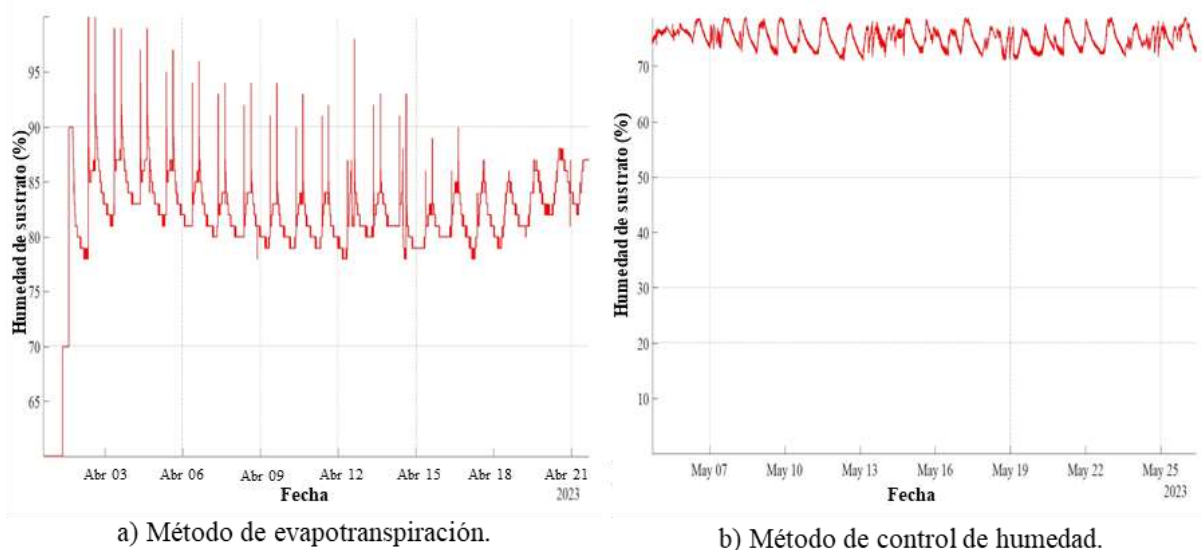


Figura 12. Lectura de la señal de humedad del sustrato durante la fase experimental.

Uno de los principales parámetros evaluados en este trabajo es el ahorro en el consumo del recurso hídrico. En investigaciones previas, como la de Rivai et al. (2019), se simula un control PI en una bomba y se compara con un método temporizado de riego por goteo, donde se logra un ahorro del 46.2% en el consumo hídrico, al implementar el controlador en lugar del método tradicional. Por su parte, Balbis (2019) compara el consumo hídrico de un control EMPC (*Economic Model Predictive Control*) con un controlador *on-off* mediante el método de evapotranspiración, donde el objetivo es mantener una lámina de agua de 24 mm en el suelo, el resultado es que el EMPC logra un

ahorro del 15% en comparación con el controlador *on-off*. Así mismo, Souza et al. (2020) implementan un controlador Mandani *Fuzzy Logic* para regular el volumen de riego y, al compararlo con un método de evapotranspiración, obtiene un ahorro del 18%.

En este proyecto, se compara el control de la humedad del sustrato con un método de evapotranspiración, el resultado es un ahorro del 69.72% en el consumo de fertirriego. Este resultado representa una mejora en el ahorro del recurso hídrico en comparación con los trabajos mencionados. Además, a diferencia de las investigaciones previas, este estudio se

realiza a escala laboratorio, lo que añade el elemento práctico y aplicable a sistemas reales.

Resultados de la validación de los sistemas de fertirriego

La investigación implementa dos metodologías, evapotranspiración y control de humedad, para el suministro de fertirriego por goteo en un sistema hidropónico. Estas metodologías se evalúan en cultivos de pimiento (*Capsicum Annuum L.*), con el propósito dese analizar la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Para calcular este parámetro, se utiliza la Ec. (15) (Hunt, 1990). El análisis incluye la medición de la longitud del tallo de 12 plantas en un invernadero hidropónico durante un periodo de 21 días. La Figura 13 muestra el proceso de medición de las plantas.

$$TCC = \frac{L_2 - L_1}{T} \quad (\text{Ec. 15})$$

Dónde:

TCC = Tasa de crecimiento del cultivo

L_2 = Longitud 2 o final

L_1 = Longitud 1 o inicial

T = Tiempo



Figura 13. Medición de plántulas.

Al finalizar las mediciones se obtienen los resultados, como se muestra en la Figura 14. Donde, se puede apreciar, la dinámica de crecimiento de los cultivos durante el periodo establecido. Al calcular la TCC promedio para este método se obtiene un valor de $0.1369 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$. El cultivo con mayor TCC fue la planta 10, con $0.2714 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$, y el de menor fue la planta 3, con $0.0286 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$. De la misma forma se evalúa el consumo de fertirriego, al utilizar un total de 213.5 L, como se muestra en la Figura 15.

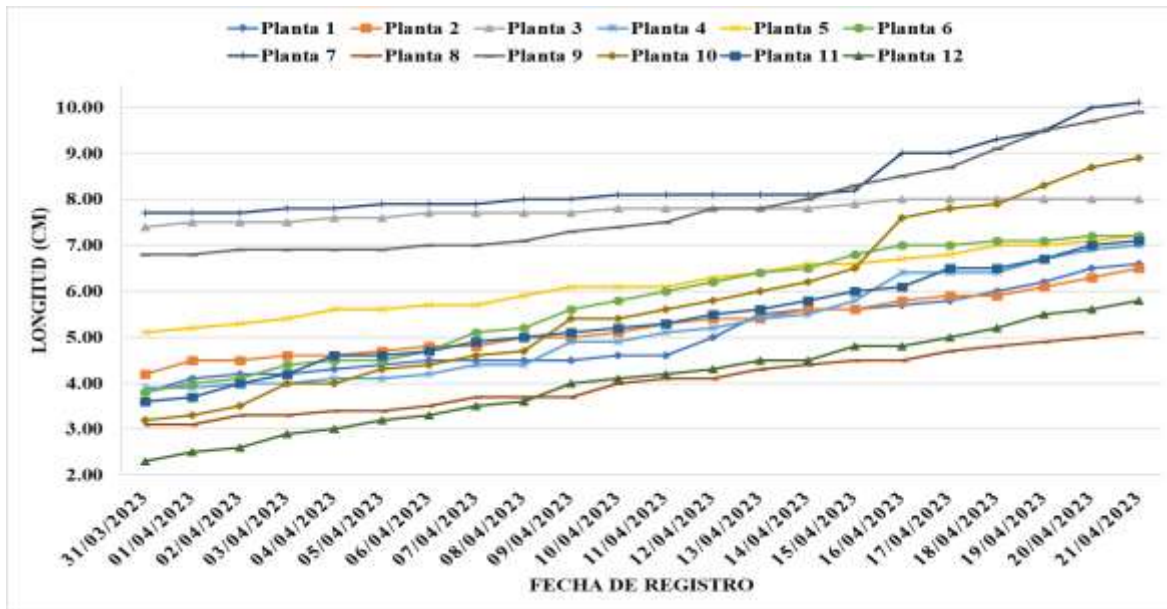


Figura 14. Longitud de las plantas con el método de evapotranspiración durante el experimento.

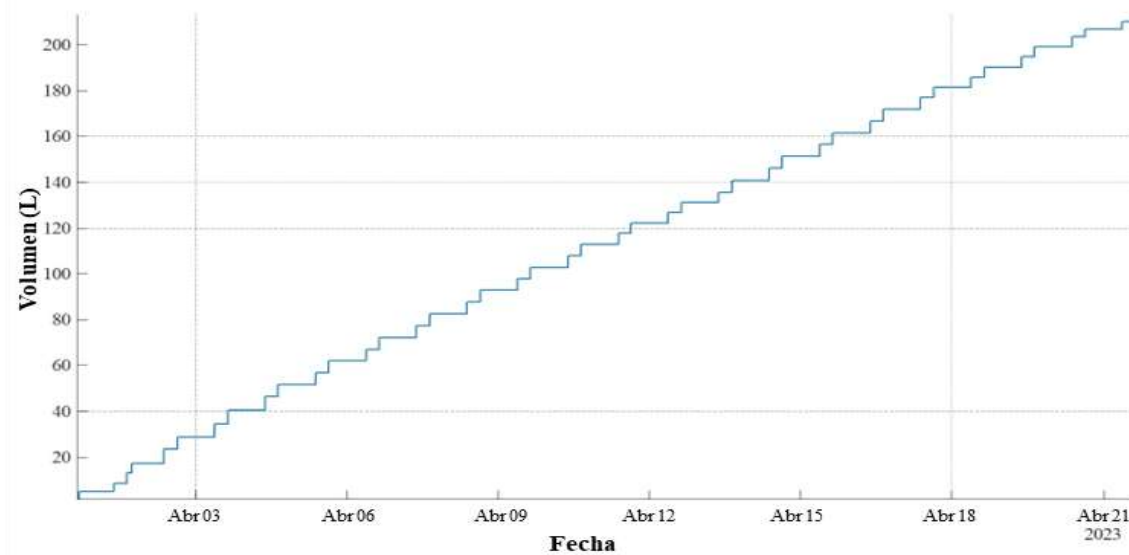


Figura 15. Volumen total de fertirriego aplicado al utilizar el método de evapotranspiración.

En la Figura 16 se muestra la dinámica de crecimiento de los cultivos con control de humedad en el sustrato. Para este método se obtuvo una TCC de $0.1196 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$. El cultivo con mayor TCC fue la planta 10, con $0.2333 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$, y el de menor TCC fue la planta 5, con $0.0733 \text{ cm} \cdot \text{día}^{-1}$. De la misma manera se evalúa el consumo de fertirriego. Para este método se obtiene un consumo de 64.57 L, este se muestra en la Figura 17.

Se muestra una disminución en la tasa de crecimiento (14.08% menor respecto al método de evapotranspiración) como un efecto esperado del riego con déficit hídrico controlado, donde el cultivo recibe un volumen de agua menor al total por evapotranspiración, lo cual mantiene la humedad del sustrato dentro de un rango favorable (71 %–79 %). En estas condiciones, la planta puede reducir su tasa de expansión foliar y elongación debido al cierre

estomático, asociado tanto al menor contenido hídrico disponible como al incremento de la temperatura máxima registrada durante el periodo experimental (52 °C frente a 46 °C en el método de evapotranspiración), condiciones que favorecen un mayor déficit de presión de vapor y una reducción temporal de la actividad fotosintética.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Soto-Bravo & Monge-Palma (2023), quienes observaron reducciones de biomasa en pimiento bajo estrategias de riego deficitario, sin afectar significativamente el rendimiento final. De igual manera, Souza et al. (2020) y Krishnan et al. (2020) con los controladores inteligentes priorizan la eficiencia hídrica frente al crecimiento vegetativo.

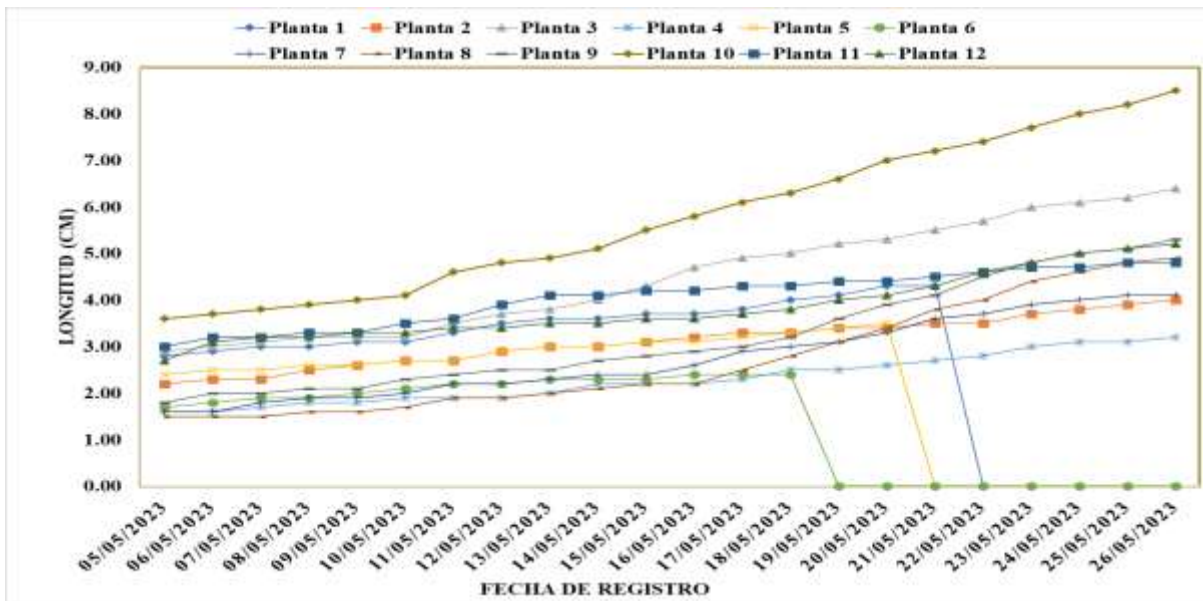


Figura 16. Longitud de las plantas con método de control de humedad durante el experimento.

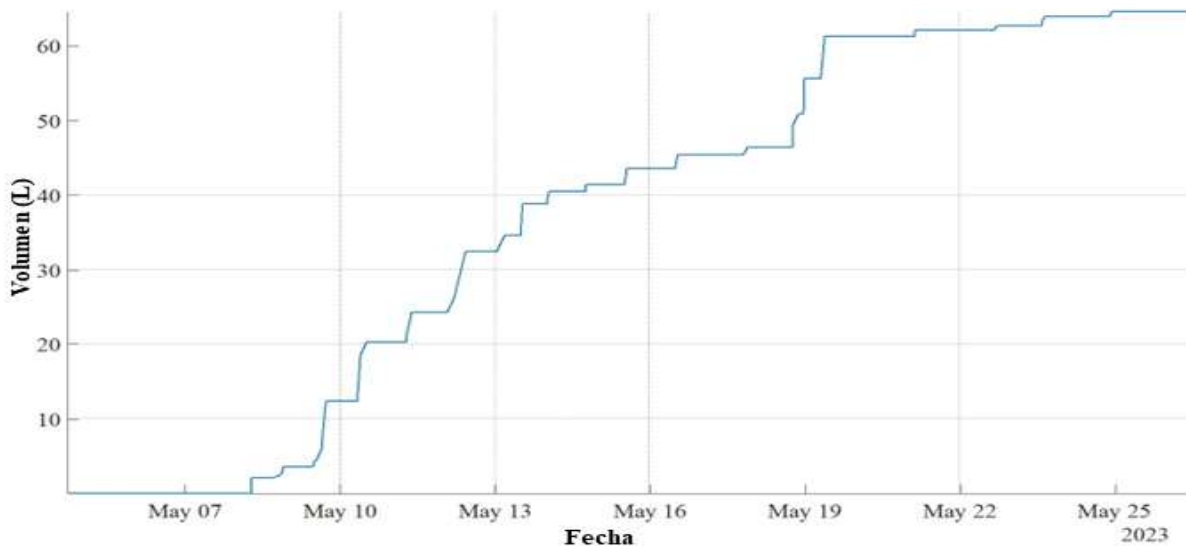


Figura 17. Volumen total de fertirriego aplicado al utilizar el método de control de humedad.

Otro parámetro para evaluar en este trabajo es el control de la humedad del sustrato. Donde, el porcentaje deseado, varía según el cultivo. Por ejemplo, Elhassan et al. (2018) implementan un control de humedad al utilizar una histéresis con un rango de 30% a 70%. De igual manera, Hamonangan et al. (2019) desarrollan un control *on-off* para una bomba y una válvula de riego que opera con una histéresis en su funcionamiento. Este estudio realiza 20 corridas y alcanza una precisión del 90%. También, Cohen-Manrique et al. (2020) ajustan un controlador PID, para satisfacer los requerimientos de humedad en un cultivo de ahuyama, e integra variables como la evapotranspiración y el balance hídrico. Este sistema, logra mantener un error menor al 2%.

Además, Souza et al. (2020) utilizan un controlador difuso para monitorear la humedad del suelo y evaluar el crecimiento del cultivo. El error del sensor es de 2.5%, y se registra una mejora del 10% en el crecimiento del cultivo en comparación con el método de evapotranspiración. En el presente trabajo, el controlador difuso alcanza un error cuadrático medio (ECM) de 3.27% al controlar la humedad del sustrato, esto mantiene un rango de humedad preciso. Esto representa una mejora al compararlo con el método de evapotranspiración, el cual presenta un ECM de 19.68%.

V. Conclusiones

En este estudio se diseña e implementa un controlador que se basa en lógica difusa, este se aplica a un sistema de fertirriego hidropónico para un invernadero de tipo micro túnel a escala laboratorio y se valida con un cultivo de pimiento (*Capsicum Annuum L.*). El sistema controlado se compara con una metodología tradicional que se basa en el modelo de evapotranspiración Penman-Monteith, donde se destaca el impacto en el uso del recurso hídrico y el

crecimiento del cultivo. Los resultados muestran que el sistema de lógica difusa obtiene un ahorro hídrico del 69.72%, esto presenta una mejora significativa frente a otros métodos reportados en la literatura. Sin embargo, no se observa un incremento en la tasa de crecimiento del cultivo, la cual fue 14.08% menor en comparación con el método de evapotranspiración. A pesar de esto, el control mantiene la humedad del sustrato en un rango estable y reduce el error cuadrático medio en comparación con el método de evapotranspiración, lo cual indica un manejo adecuado del recurso hídrico sin afectar el desarrollo del cultivo.

El uso de la lógica difusa en sistemas de fertirriego tiene potencial de aplicación en otros sistemas agrícolas, especialmente en condiciones donde la disponibilidad de agua es limitada y se requiere una mejora en la precisión del riego. Además, pueden ser implementados en sistemas no lineales sin la necesidad de un modelo matemático, lo que genera una alternativa para la producción en invernaderos. No obstante, la principal limitación del estudio es la falta de comparación con otros controladores.

Como trabajo futuro, se propone integrar técnicas de control adicionales, como la que se basa en redes neuronales artificiales y control PID, con el fin de evaluar su desempeño comparativo en términos de eficiencia hídrica y crecimiento del cultivo. Asimismo, se sugiere extender la experimentación a ciclos productivos completos, con el propósito de validar la aplicabilidad del sistema en distintos contextos agrícolas. Finalmente, se recomienda incluir plantas testigo y realizar ajustes de biomasa, para evaluar el desempeño y la precisión de los controladores a implementar.

VI. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, Tecnológico Nacional de México, Campus Culiacán y al proyecto TecNM: 19224-24p, por el apoyo financiero brindado y al por las facilidades para la ejecución del proyecto.

VII. Referencias

Alberto, M., Nava, G., Alberto, O., Espinosa, R., & Nieto, N. D. (2023). manual de producción de plantas medicinales con técnica de hidroponía. <https://www.researchgate.net/publication/370490962>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).

Azua Barron, M., Arteaga-Ramirez, R., Vázquez-Peña, M. A., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(1), 125–137. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1906>

Balbis, L. (2019). Economic Model Predictive Control for Irrigation Systems. 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2019.8880332>

Beer, F. P. ., Johnston, E. Rusell., Eisenberg, E. R. ., Mazurek, D. F. ., León Cardenas, Javier., & Murrieta Murrieta, J. Elmer. (2007). *Mécanica vectorial para ingenieros: estática*. McGraw-Hill Interamericana.

Cohen-Manrique, C. S., Burbano-Bustos, A. F., Salgado-Ordosgoitia, R. D., & Merlano-Porto, R. H. (2020). Control de riego en

cultivos de ahuyama en Sincelejo, Sucre (Colombia) gestionados a través del Internet de las Cosas. *Información Tecnológica*, 31(5), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000500079>

Dorf, R. C. ., Bishop, R. H. ., Dormido Canto, S., & Dormido Canto, Raquel. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación.

Dwiratna, S., Amaru, K., & Nanda, M. A. (2022). The Modified Hydroponic Kit Based on Self-Fertigation System Designed for Remote Areas. *Horticulturae*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8100948>

Elhassan Ahmed, O. M., Osman, A. A., & Awadalkarim, S. D. (2018). A Design of an Automated Fertigation System Using IoT. 2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCCEEE.2018.8515772>

Hamonangan Nasution, T., Dahlan Parinduri, A., Adlin Harahap, L., & Fahmi Nasution, C. (2019). Design of soil moisture control prototypes for plant cultivation. 2019 The 3rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM), 82–85. <https://doi.org/10.1109/ELTICOM47379.2019.8943884>

Hunt, R. (1990). *Basic Growth Analysis*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6>

Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Raja, S., Kumar, R., Thong, P. H., & Son, L. H. (2020). Fuzzy Logic based Smart Irrigation System using Internet of Things. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119902>

Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., & Ortiz-Medel, J. (2010). Comportamiento de

la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 89–103.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400005&lng=es&nrm=iso

Merritt, H. E. (1967). *Hydraulic Control Systems*. John Wiley & Sons. www.manaraa.com

Núñez-González, G., Velázquez-Pérez, D., Pelayo-Cortés, F. J., & Barboza-Jiménez, P. (2019). Analysis of reference evapotranspiration behavior during the rainy season at five weather stations in the Lerma-Chapala basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(2), 147–159. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.06.014>

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.

Ordoñez Avila, J. L., & Portillo, E. S. (2020). Diseño e Implementación de un Controlador Difuso para Control de Frecuencia de un Motor en un PLC S7-1200. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.490>

Perlite Institute. *Water-Holding Capacity of Perlite*. 2019. Available online: <https://hessperlite.com/PDFs/Perlite-WaterHolding-Capacity.pdf>

Rivai, M., Suwito, Ashari, M., & Mustaghfirin, M. A. (2019). Drip Irrigation System using BLDC Motor-driven Direct Pumping and Soil Moisture Sensor. *ICOMITEE*, 221–226. <https://doi.org/10.1109/ICOMITEE.2019.8921024>

Rodríguez-Fernández, J., Cerdá-Filiu, L. M., & Sánchez-Horneros, R. (2014). *Automatismos industriales* (C. Lara

Carmona, Ed.; 1st ed.). Paraninfo. www.paraninfo.es

SEMARNAT. (2020). Decreto por el que se aprueba el Programa Nacional Hídrico 2020-2024.

https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/pnh/PNH_2020_2024.pdf

Soto-Bravo, F., & Monge-Palma, J. I. (2023). Comportamiento morfofisiológico y productivo de chile dulce hidropónico en invernadero con diferentes estrategias de manejo del fertiriego. *Agronomía Costarricense*, 37–57. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53948>

Souza, G., Aquino, P. T., Filev Maia, R., Kamienski, C., & Soininen, J.-P. (2020). A fuzzy irrigation control system. *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/GHTC46280.2020.9342960>

van Os, E. A., Gieling, Th. H., & Lieth, J. H. (2019). *Technical Equipment in Soilless Production Systems*. In *Soilless Culture* (pp. 587–635). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00013-X>

Vázquez Rueda, M. G., Ibarra Reyes, M., Flores García, F. G., & Moreno Casillas, H. A. (2018). 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*, 147(5), 93–103. <https://doi.org/10.13053/rcs-147-5-7>