



Efecto del agotamiento hídrico sobre propiedades físico-hidráulicas, fisicoquímicas y agronómicas en chile y tomate hidropónicos*

Effect of water depletion on physical-hydraulic, physicochemical, and agronomic properties of hydroponic pepper and tomato

Alejandro Betancourt-Flores¹, Freddy Soto-Bravo¹

* Recepción: 19 de noviembre, 2025. Aceptación: 9 de abril, 2026. El trabajo formó parte de la tesis de licenciatura del primer autor, realizada en la Universidad de Costa Rica.

¹ Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. alejandra.betancourt@ucr.ac.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-7757-5967>); freddy.sotobravo@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>).

Resumen

Introducción. La caracterización físico-hidráulica de los sustratos es fundamental para definir estrategias de riego que mejoren la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes, así como el rendimiento de los cultivos en invernadero. **Objetivo.** Evaluar el efecto de tres niveles de agotamiento hídrico sobre propiedades físico-hidráulicas y fisicoquímicas del sustrato, así como sobre el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia de uso del agua en cultivos de chile dulce y tomate en fibra de coco bajo invernadero. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó de agosto de 2020 a enero de 2021 en un invernadero multitúnel de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Se evaluaron tres niveles de agotamiento hídrico (Ag_{11} , Ag_{22} y Ag_{32}) en el sustrato, en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. En variables de respuesta se midieron humedad volumétrica (θ), conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$), pH, conductividad eléctrica (CE), volumen y frecuencia de riego, área foliar, materia seca, rendimiento comercial y eficiencia de uso del agua (EUA). Dichas variables fueron analizadas utilizando el entorno estadístico R. **Resultados.** El tratamiento Ag_{11} , con riegos más frecuentes y de menor volumen, mantuvo una humedad adecuada, CE estable y mayor $K_{(\theta)}$, lo que favoreció mayor crecimiento vegetativo y reproductivo, así como una alta EUA. El tratamiento Ag_{22} obtuvo rendimientos y EUA equivalentes a Ag_{11} , con menor frecuencia de riego, pero mayor volumen, sin incrementar la CE a niveles críticos. Ag_{32} redujo significativamente el crecimiento, la producción y la EUA, sin incrementar la CE a niveles críticos, con frecuencia de riego similar a Ag_{22} , pero mayor volumen aplicado. **Conclusión.** El tratamiento Ag_{11} representó un punto de equilibrio entre aireación, retención de agua y las conductividades hidráulicas y eléctricas, respaldado por la estabilidad de los rendimientos obtenidos y el uso eficiente del agua.

Palabras clave: fibra de coco, irrigación deficitaria, eficiencia de uso del agua, conductividad hidráulica insaturada, conductividad eléctrica.

Abstract

Introduction. Physical-hydraulic characterization of substrates is critical for designing irrigation strategies aimed at enhancing water and nutrient use efficiency and improving crop performance in greenhouse systems. **Objective.** To



evaluate the effect of three levels of water depletion on the physical-hydraulic and physicochemical properties of the substrate, as well as on growth, yield, and water use efficiency of sweet pepper and tomato crops grown in coconut fiber (coir) under greenhouse conditions. **Materials and methods.** The study was conducted from August 2020 to January 2021 in a multi tunnel greenhouse at the Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. Three substrate water depletion levels (Ag_{11} , Ag_{22} y Ag_{32}) were evaluated in a completely randomized design with three replicates. The response variables included volumetric water content (θ), unsaturated hydraulic conductivity ($K_{(\theta)}$), pH, electrical conductivity (EC), irrigation volume and frequency, leaf area, dry matter, marketable yield, and water use efficiency (WUE). Data was analyzed using the R statistical environment. **Results.** The Ag_{11} treatment, characterized by more frequent irrigations with lower volumes, maintained adequate moisture, stable EC, and higher $K_{(\theta)}$, which promoted greater vegetative and reproductive growth, as well as high water use efficiency (WUE). The Ag_{22} treatment achieved yields and WUE values equivalent to those of Ag_{11} , with lower irrigation frequency but higher volume irrigations, without increasing EC to critical levels. The Ag_{32} treatment significantly reduced growth, yield, and WUE, without raising EC to critical levels, showing a similar irrigation frequency to Ag_{22} but with a higher applied volume. **Conclusion.** The Ag_{11} treatment represented an equilibrium among aeration, water retention, and hydraulic and electrical conductivities, as evidenced by stable yields and efficient water use.

Keywords: coir, deficit irrigation, water use efficiency, unsaturated hydraulic conductivity, electrical conductivity.

Introducción

Las técnicas de riego de precisión en cultivos sin suelo permiten reducir los lixiviados con alta concentración de nutrientes y optimizar el uso del agua (Plaza et al., 2021). Las herramientas de análisis multicriterio facilitan la identificación de tasas óptimas de riego y fertilización, logrando un uso eficiente del recurso hídrico y nutrimental, sin afectar el rendimiento y la calidad del fruto (Yu et al., 2023). La programación del riego fundamentado en la evapotranspiración y en la extracción nutrimental del cultivo, junto con el uso de tensiómetros y curvas de desorción hídrica, disminuye las pérdidas por percolación y favorece la eficiencia de uso del agua y los fertilizantes (Méndez-Cifuentes et al., 2020; Savvas et al., 2023; Savvas & Gruda, 2018).

La eficacia de las prácticas de riego depende de las propiedades físico-hidráulicas y fisicoquímicas del sustrato, como lo evidencian diversos estudios (Abad et al., 2002; Carlile et al., 2015; Gruda, 2019; Grunert et al., 2016; Soto-Bravo & Betancourt-Flores, 2022). Dichas propiedades varían según su origen, granulometría y tipo de contenedor, lo que influye en la dinámica del agua en el sustrato (Heller et al., 2015; Savvas & Gruda, 2018). Esta variabilidad dificulta estandarizar el manejo del riego, lo cual puede afectar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Por ello, generar información técnica sobre los sustratos utilizados en la producción agrícola es fundamental para un manejo adecuado del riego (Martínez-Rodríguez et al., 2017; Schulker et al., 2021).

La fibra de coco se ha utilizado ampliamente como sustrato en cultivos sin suelo en invernadero por su alta capacidad de retención de agua y adecuada aireación, que favorecen un óptimo desarrollo radicular. Sin embargo, la variabilidad en el procesado y el tamaño de partícula alteran su capacidad de retención, la conductividad hidráulica no saturada y la movilidad de nutrientes. Estas variaciones limitan la precisión en el manejo del riego y, en consecuencia, afectan el rendimiento y el uso eficiente del agua (Giraldelli et al., 2020; Park et al., 2010).

La conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$) determina la velocidad del flujo de agua en el sustrato (Londra, 2010). La variabilidad en la humedad por un manejo impreciso del riego afecta el comportamiento de la $K_{(\theta)}$, debido a que la arquitectura y distribución de poros varía conforme a los cambios de humedad en el perfil del sustrato. Cuando la humedad disminuye, la $K_{(\theta)}$ se reduce y la absorción radicular se vuelve ineficiente (Conceição et al.,

2014). Sustratos con alta $K_{(\theta)}$ en condiciones adecuadas de humedad favorecen la absorción de agua incluso bajo déficit hídrico. Comprender y ajustar este fenómeno puede marcar la diferencia en el uso eficiente del agua (Fields et al., 2017).

El riego deficitario es una estrategia que, al reducir la disponibilidad hídrica en el sustrato y con ello la conductividad hidráulica no saturada $K_{(\theta)}$, modula el flujo hídrico hacia la planta e induce respuestas morfofisiológicas con fines específicos, ya sean vegetativos o reproductivos (Marfà & Orozco, 1995; Voogt & Bar-Yosef, 2019). Existen tres estrategias: clásica, regulada y parcial en zona radicular, cada una con diferentes técnicas y niveles de agotamiento hídrico. En la clásica, el suministro de agua es menor que la evapotranspiración del cultivo. En la regulada, el aporte es inferior a la evapotranspiración y se ajusta según la respuesta de la planta al estrés. En la parcial, se irriga una parte de la rizosfera (Khapte et al., 2019).

Para definir la estrategia de riegos deficitarios, es necesario disponer de las curvas de desorción de humedad del sustrato, para definir umbrales de agotamiento hídrico que permitan reducir la transpiración sin comprometer el rendimiento ni la calidad (Kabir et al., 2021; Temnani et al., 2023). El objetivo del riego deficitario es mantener un adecuado equilibrio entre aire y agua dentro del rango de agua fácilmente disponible para la planta (Castro et al., 2019; Peng et al., 2020; Soto Bravo, 2018). Estas prácticas promueven un uso eficiente del agua e inducen a ajustes fisiológicos de las plantas que pueden incrementar su productividad (Khapte et al., 2019).

En sistemas hortícolas intensivos bajo invernadero, definir criterios de riego técnicamente sustentados adquiere relevancia ante la creciente variabilidad climática y la presión sobre el recurso hídrico (Lakhiar et al., 2024). La eficiencia en el uso del agua y los nutrientes no solo inciden sobre la productividad, sino también sobre la sostenibilidad del manejo agronómico, al influir en la acumulación de sales y en pérdidas por lixiviación (Incrocci et al., 2020). En estos sistemas, donde la horticultura protegida requiere estrategias de manejo ajustadas a las condiciones del cultivo y del sustrato, generar información sobre la dinámica hídrica resulta fundamental para fortalecer la base técnica del riego y del fertirriego (Gohardoust et al., 2020; Papadimitriou et al., 2024).

En Costa Rica, el tomate y el chile dulce constituyen cultivos de importancia comercial dentro de la horticultura intensiva (Madriz Arrieta, 2023; Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria [SEPSA], 2024). Su producción bajo ambiente protegido implica sistemas intensivos en insumos que dependen de un manejo preciso del riego (López Marín, 2017; Madriz Arrieta, 2023). En ambas especies se ha demostrado que variaciones en la disponibilidad de agua modifican el estado hídrico de la planta, el crecimiento, el rendimiento y la calidad del fruto, lo que respalda su uso como modelos para estudiar el agotamiento hídrico en sustratos (Liu et al., 2024; Yang et al., 2024).

En los cultivos de chile dulce y tomate producidos en fibra de coco, la definición de umbrales de agotamiento hídrico continúa limitada en Costa Rica, especialmente en cuanto a sus implicaciones para el manejo del riego, el desempeño del cultivo y el aprovechamiento del agua. Esta falta de información restringe la definición de criterios de manejo hídrico técnicamente sustentados para sistemas protegidos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de tres niveles de agotamiento hídrico sobre propiedades físico-hidráulicas y fisicoquímicas del sustrato, así como sobre el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia de uso del agua en cultivos de chile dulce y tomate en fibra de coco bajo invernadero.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y variables climatológicas

El estudio se realizó desde siembra hasta cosecha (agosto de 2020 a enero de 2021) en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica (10°01'N, 84°16'O, 840 m s. n. m.). El sitio presenta promedios anuales de 1940 mm de precipitación, 22 °C de

temperatura y 78 % de humedad relativa. El experimento se llevó a cabo en un invernadero multitúnel con cubierta de polietileno (200 μm), malla antinsectos (50 mesh) en paredes, ventilación pasiva y apertura cenital automatizada según velocidad de viento e intensidad de la lluvia.

Se utilizó un sistema de riego por goteo compuesto por tuberías de polietileno con goteros antidrenantes y autocompensados (2,3 L h⁻¹) sectorizados con válvulas solenoides para cada unidad experimental. Durante el experimento se monitoreó diariamente la radiación solar global con un piranómetro, y la temperatura y la humedad relativa, con una sonda. La integral diaria de radiación solar varió entre 0,1 y 1,1 kW m⁻², mientras que los valores globales de temperatura máxima, mínima y promedio fueron 35 °C, 16 °C y 25 °C, respectivamente, y para humedad relativa, 100 %, 35 % y 80 %, en el mismo orden.

Sistema de cultivo, propiedades físicas del sustrato y características del material vegetal empleado

El cultivo se estableció en tablas de fibra de coco (100 cm × 14 cm × 13 cm: 18,2 L), cuyas propiedades físicas se determinaron según la norma europea UNE-EN-13041 (Asociación Española de Normalización y Certificación [AENOR], 2007). El sustrato presentó 63 % de partículas >1 mm, 37 % de partículas <1 mm, 93,47 % de porosidad total, 6,53 % de partículas sólidas, 78,34 % de retención de humedad y 15,10 % de aireación a capacidad de contenedor (1 kPa). En ambos cultivos, las tablas de sustrato se distribuyeron en hileras separadas por 1,5 m, donde se sembraron tres plantas cada 0,33 m, para una densidad de 2 plantas/m².

Se utilizó el híbrido de tomate Gladiador de crecimiento indeterminado, frutos de larga vida poscosecha y resistencia a *Verticillium* sp., *Fusarium* raza 1 y 2, así como al virus TYLCV. En chile dulce se sembró el híbrido Dulcítico de crecimiento indeterminado, frutos de forma cónica de color verde-rojizo, alto grado Brix y un rendimiento de hasta 12,8 kg m⁻² (Soto et al., 2019). Se determinaron los valores promedio de humedad volumétrica y capacidad de aireación (Cuadro 1), según la norma UNE-EN-13041 (AENOR, 2007), mediante el uso de una caja de arena.

Cuadro 1. Contenido volumétrico de agua, capacidad de aireación y volúmenes equivalentes de las fracciones hídricas del sustrato en tablas de fibra de coco a diferentes potenciales mátricos. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Table 1. Volumetric water content, air capacity and equivalent volumes of water fractions in coir substrate at different matric potentials. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Research Station, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Potencial mátrico (kPa)	Humedad volumétrica			Capacidad de aireación		
	Resultado (%)	Óptimo* (%)	Volumen (L)	Resultado (%)	Óptimo* (%)	Volumen (L)
0	93,5	--	17,0	0,0	--	0,0
0,3	92,1	--	16,8	1,4	--	0,2
0,5	89,4	--	16,3	4,1	--	0,7
1,0	78,3	55-70	14,3	15,1	15-30	2,8
1,5	71,4	--	13,0	22,1	--	4,0
2,0	65,1	--	11,9	28,4	--	5,2
2,5	61,8	--	11,2	31,7	>15	5,8
3,0	59,7	--	10,9	33,8	--	6,1
5,0	54,7	30-40	10,0	38,7	45-55	7,1
7,5	53,0	--	9,6	40,5	--	7,4
10,0	52,4	25-30	9,5	41,1	55-60	7,5

*Adaptado de Ansorena (1994). / *Adapted from Ansorena (1994).

Diseño experimental y tratamientos

Para ambos cultivos se establecieron tres tratamientos con niveles de agotamiento del contenido de humedad volumétrica (θ) clásicos de 11 %, 22 % y 32 %, bajo un diseño completamente al azar, utilizando como referencia la curva original de desorción de agua del sustrato, correspondiente al 0 % de agotamiento hídrico (Ag_0). En Ag_{11} , con un 11 % de agotamiento, el potencial mátrico fue de 1,70 kPa y la θ de 69,90 %. En Ag_{22} , con un 22 % de agotamiento, se alcanzaron 2,50 kPa con θ de 61,45 %. Por su parte, Ag_{32} , con 32 % de agotamiento, alcanzó 7,50 kPa con θ de 53,01 %. Se aplicaron tres repeticiones por tratamiento, para un total de nueve unidades experimentales de 45 plantas cada una.

El volumen de riego para cada tratamiento de agotamiento hídrico se calculó a partir del agua total disponible (Cuadro 2), el volumen del sustrato (18,2 L) y un porcentaje de drenaje del 15 % según Soto et al. (2019). Los valores obtenidos fueron de 1,54 L, 3,07 L y 4,61 L por tabla de sustrato para los tratamientos con 11 %, 22 % y 32 % de humedad volumétrica (θ), respectivamente. Estos volúmenes representaron la reposición hídrica correspondiente a los umbrales de agotamiento establecidos para cada tratamiento.

Cuadro 2. Tipos de agua en el sustrato de fibra de coco: agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua total disponible y agua no disponible. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Table 2. Water types in coir substrate: readily available water, reserve water, total available water, and unavailable water. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Tipos de agua	%	Óptimo* (%)	Volumen (L)
Agua fácilmente disponible	23,62	20-30	4,3
Agua de reserva	2,37	5,0-10,0	0,4
Agua total disponible	25,99	24-40	4,7
Agua no disponible	52,35	--	9,5

*Adaptado de Ansorena (1994). / *Adapted from Ansorena (1994).

La activación del riego se controló automáticamente según la demanda hídrica del cultivo utilizando el método de reposición de agua en el sustrato. Para activar el riego se utilizaron como valores consigna los contenidos de humedad volumétrica (θ) correspondientes para cada nivel de agotamiento. Mediante un algoritmo automático, el riego se activó cuando la θ disminuía hasta estos valores y el porcentaje de drenaje alcanzaba un valor objetivo de 15 %. El algoritmo calculó el porcentaje de drenaje como el cociente entre el volumen drenado y el volumen aplicado.

Variables respuesta

Durante el periodo experimental, se midieron variables físico-hidráulicas y fisicoquímicas del sustrato, variables del riego y variables agronómicas del cultivo. En sustrato se evaluaron parámetros físico-hidráulicos, que incluyeron el contenido de humedad volumétrica (θ %) y la conductividad hidráulica no saturada ($tK_{(\theta)}$ cm min⁻¹), y parámetros fisicoquímicos, como la conductividad eléctrica *in situ* (CE_i dS m⁻¹) y en drenaje (CE_d ; dS m⁻¹). La CE_i y la θ se monitorearon en tiempo real mediante un sensor capacitivo de reflectometría de dominios de tiempo (TDR). La $K_{(\theta)}$ se determinó por el método de Van Genuchten (1980) y Mualem (1976) según la ecuación 1.

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^n \right)^m \right]^2 \quad (1)$$

Donde, $K_{(\theta)}$ es la conductividad hidráulica no saturada a cierta humedad volumétrica (θ), K_s es la conductividad hidráulica en condiciones de saturación máxima, θ_r es la humedad residual (humedad mínima) y θ_s es la humedad saturada (humedad máxima). Los parámetros l y m son constantes empíricas que se emplean en el modelo de Van Genuchten y Mualem para describir la relación entre la θ y $K_{(\theta)}$ en medios porosos como los sustratos. En el caso de la fibra de coco, suele estar en el rango de 1,3 a 1,7, por lo que se asume un valor promedio de l ; se calcula de conformidad con la ecuación 2; y m generalmente es 0,5.

$$m = 1 - \frac{1}{n} = 1 - \frac{1}{1,5} = 0,33 \quad (2)$$

En parámetros de riego, se midieron los volúmenes de riego y de drenaje y el número de riegos diarios. Para cada tratamiento y unidad experimental, en un lisímetro que contenía un saco de cultivo con tres plantas, se midieron diariamente el volumen de riego con un caudalímetro, y el volumen de drenaje, con un pluviómetro de precisión. Paralelamente, en submuestras del volumen drenado, se midieron semanalmente el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica en drenaje (CE_d), utilizando un pHmetro-conductivímetro. El número de riegos por día se cuantificó mediante el registro de pulsos eléctricos correspondientes a la hora de inicio de cada evento de riego.

En variables agronómicas del cultivo se evaluó el área foliar ($m^2/planta$), la materia seca ($kg/planta$), el rendimiento comercial ($kg/planta$) y la eficiencia de uso del agua ($kg\ m^{-3}$). Durante el ciclo de cultivo, se realizaron tres mediciones de área foliar y de materia seca, en tres plantas por unidad experimental para un total de nueve plantas por tratamiento. El área foliar se determinó removiendo las hojas de cada planta y colocándolas en un medidor digital de área foliar de banda continua. La materia seca se determinó para cada planta muestreada en un horno de ventilación forzada a $72\ ^\circ C$ hasta alcanzar peso constante.

El rendimiento comercial se cuantificó semanalmente durante un período de 14 semanas de cosecha, en 12 plantas por repetición y 36 plantas por tratamiento. Dicho rendimiento incluyó el total de frutos de primera, segunda y tercera calidad. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua (EUA) se calculó como el cociente entre el rendimiento comercial de fruto fresco ($kg\ m^{-2}$) y el consumo hídrico ($m^3\ m^{-2}$) según la ecuación 3 propuesta por Salazar et al. (2014).

$$EUA = \frac{\text{Rendimiento (kg } m^{-2})}{\text{Volumen (m}^3\ m^{-2})} \quad (3)$$

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó el *software* estadístico R (versión 4.1.3), junto con las librerías especializadas “agricolae”, “tidyverse”, “readxl”, “stringr”, “DT”, “car”, “carData” y “ggplot2” (Möhring et al., 2021). Inicialmente, se realizaron pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas (Bartlett) para verificar los supuestos del análisis de varianza (ANDEVA). Dado que dichos supuestos se cumplieron, se procedió a realizar el ANDEVA.

En los casos en los que se encontraron efectos significativos de los tratamientos de agotamiento hídrico, se llevó a cabo una comparación múltiple de medias ($p < 0,05$) entre tratamientos, según Di Rienzo et al. (2002). Posteriormente, se realizaron contrastes del tipo “todos contra todos”, considerando que solo se incluyeron tres tratamientos. Dado que estos contrastes no son ortogonales, se aplicó la corrección de Bonferroni, ajustando el nivel de significancia como $\alpha/(k-1)$, donde k corresponde al número de comparaciones efectuadas.

Resultados

Variables físico-hidráulicas y fisicoquímicas del sustrato

Se observó una disminución progresiva del contenido de humedad volumétrica con el incremento del potencial mátrico en ambos cultivos. En tomate (Figura 1A), la pérdida de agua fue más pronunciada entre 0,3 y 3 kPa, con una estabilización cercana al 50 % a partir de 10 kPa. Los tratamientos con mayor agotamiento mostraron una menor capacidad de retención hídrica, siendo el tratamiento de Ag_{11} el más equilibrado entre estos. En chile dulce (Figura 1B), el comportamiento fue similar, aunque con mayor dispersión entre tratamientos. A partir de 1 kPa las diferencias se hicieron más evidentes, destacando Ag_{32} por registrar los valores más bajos de humedad, lo que reflejó una rápida liberación de agua del sustrato bajo condiciones de agotamiento hídrico.

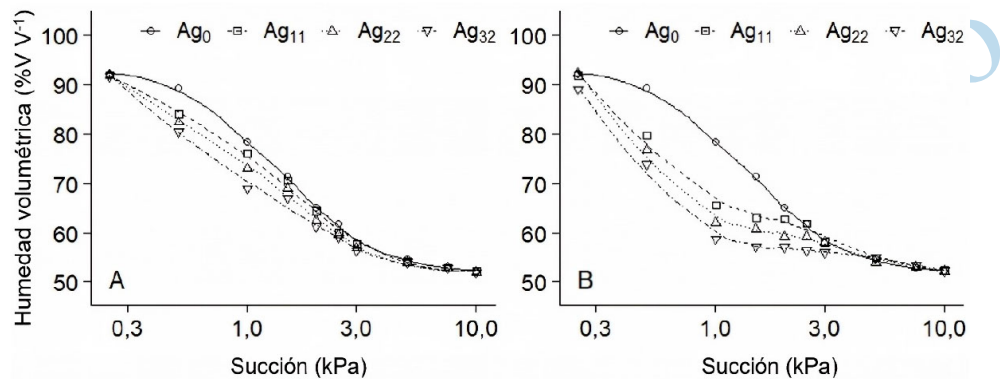


Figura 1. Curvas de desorción de agua a diferentes potenciales mátricos en sustrato de fibra de coco. **A.** Cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). **B.** Cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum* L.). Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Ag_0 , Ag_{11} , Ag_{22} y Ag_{32} indican niveles de agotamiento del 0 %, 11 %, 22 % y 32 %, respectivamente.

Figure 1. Water desorption curves at different matric potentials in coir substrate. **A.** Tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.). **B.** Sweet pepper crop (*Capsicum annuum* L.). Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2020.

Ag_0 , Ag_{11} , Ag_{22} , and Ag_{32} indicate depletion levels of 0 %, 11 %, 22 %, and 32 %, respectively.

La reducción del contenido hídrico del sustrato provocó una disminución en la conductividad hidráulica no saturada, efecto que se acentuó con el incremento del agotamiento. En tomate, el descenso fue notorio a partir del 22 %, mientras que en chile dulce se intensificó al 32 %, evidenciando menor capacidad del sustrato para conducir agua bajo déficit hídrico. El pH mostró una tendencia decreciente con el incremento del agotamiento, pasando de valores cercanos a la neutralidad a condiciones ligeramente ácidas. Asimismo, la conductividad eléctrica, tanto *in situ* como en drenaje, presentó valores menores en los tratamientos con mayor agotamiento, reflejando menor disponibilidad y movilidad de iones en el sustrato (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores promedio de parámetros físico-hidráulicos y fisicoquímicos del sustrato de fibra de coco bajo distintos niveles de agotamiento hídrico en cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y chile dulce (*Capsicum annuum* L.) en condiciones de invernadero. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Table 3. Average physical-hydraulic and physicochemical properties of coir substrate under varying water depletion levels in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and sweet pepper crops (*Capsicum annuum* L.) grown under greenhouse conditions. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Variable respuesta	Tratamiento	Agotamiento (%)	Tomate	Chile dulce
Conductividad hidráulica no saturada ($K_{(θ)}$)(cm min ⁻¹)	Ag ₁₁	11	0,77 a	0,13 a
	Ag ₂₂	22	0,55 b	0,12 ab
	Ag ₃₂	32	0,29 c	0,05 c
Potencial de hidrógeno (pH)	Ag ₁₁	11	6,78 a	6,99 a
	Ag ₂₂	22	6,36 ab	6,60 ab
	Ag ₃₂	32	5,90 bc	5,86 bc
Conductividad eléctrica <i>in situ</i> (CE _i ; dS m ⁻¹)	Ag ₁₁	11	0,80 a	0,80 a
	Ag ₂₂	22	0,57 b	0,53 b
	Ag ₃₂	32	0,69 bc	0,66 bc
Conductividad eléctrica en drenaje (CE _d ; dS m ⁻¹)	Ag ₁₁	11	2,60 a	2,63 a
	Ag ₂₂	22	2,45 b	2,45 b
	Ag ₃₂	32	2,50 bc	2,48 bc

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Ag₁₁, Ag₂₂ y Ag₃₂ indican niveles de agotamiento del 11 %, 22 % y 32 %, respectivamente. / Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$). Ag₁₁, Ag₂₂, and Ag₃₂ indicate 11 %, 22 %, and 32 % depletion levels, respectively.

Parámetros de manejo del riego

En ambos cultivos el incremento del nivel de agotamiento hídrico se asoció con una mayor cantidad de agua aplicada por evento de riego, conforme a la definición de los umbrales de agotamiento. La aplicación se realizó con menor frecuencia, reflejando una reducción en el número de riegos diarios a medida que aumentó el agotamiento. En condiciones de menor agotamiento, el manejo del riego requirió una mayor frecuencia de aplicación y volúmenes menores por evento, tanto en el riego como en el drenaje. Este patrón evidenció un régimen hídrico constante entre los tratamientos, con diferencias en la frecuencia de riego. El tratamiento Ag₁₁ se destacó por presentar el mejor equilibrio entre el consumo hídrico y energético (Cuadro 4).

Variables agronómicas de los cultivos

El aumento del agotamiento hídrico provocó una reducción progresiva del área foliar (Figura 2), la acumulación de materia seca y el rendimiento comercial en ambos cultivos, lo que evidencia la sensibilidad de las plantas ante la menor disponibilidad de agua en el sustrato. Los tratamientos con niveles bajos de agotamiento (11 % y 22 %) mostraron un crecimiento vegetativo más uniforme y un rendimiento mayor en comparación con el tratamiento de 32 %, donde el efecto del estrés hídrico fue más notorio. Asimismo, la eficiencia en el uso del agua fue mayor bajo condiciones de menor agotamiento, indicando un aprovechamiento más adecuado del recurso y una mejor relación entre el volumen aplicado y el rendimiento obtenido (Cuadro 5).

Cuadro 4. Valores promedio de variables del riego y drenaje en cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y chile dulce (*Capsicum annuum* L.) en fibra de coco bajo distintos niveles de agotamiento hídrico en condiciones de invernadero. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Table 4. Average irrigation and drainage parameters in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in coir under varying water depletion levels under greenhouse conditions. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Variable respuesta	Tratamiento	Agotamiento (%)	Tomate	Chile dulce
Volumen de riego (ml tabla ⁻¹) por evento de riego	Ag ₁₁	11	1549,86 a	1498,51 a
	Ag ₂₂	22	3112,96 b	3089,89 b
	Ag ₃₂	32	4062,86 c	4265,35 c
Número de riegos diarios (NR)	Ag ₁₁	11	6,0 a	5,0 a
	Ag ₂₂	22	3,5 b	4,2 ab
	Ag ₃₂	32	3,3 bc	3,7 bc
Volumen drenado (ml tabla ⁻¹) por evento de drenaje	Ag ₁₁	11	262,22 a	332,58 a
	Ag ₂₂	22	499,78 b	438,31 b
	Ag ₃₂	32	637,25 c	495,16 b

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Ag₁₁, Ag₂₂ y Ag₃₂ indican niveles de agotamiento del 11 %, 22 % y 32 %, respectivamente. / Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($p < 0,05$). Ag₁₁, Ag₂₂, and Ag₃₂ indicate 11 %, 22 %, and 32 % depletion levels, respectively.

Cuadro 5. Valores promedio de área foliar, materia seca, rendimiento comercial y eficiencia de uso del agua en cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y chile dulce (*Capsicum annuum* L.) en fibra de coco bajo distintos niveles de agotamiento hídrico en condiciones de invernadero. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Table 5. Average leaf area, dry matter, marketable yield, and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in coir under varying water depletion levels under greenhouse conditions. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Variable respuesta	Tratamiento	Agotamiento (%)	Tomate	Chile dulce
Área foliar (m ² planta ⁻¹)	Ag ₁₁	11	1,12 a	1,34 a
	Ag ₂₂	22	0,98 b	1,17 ab
	Ag ₃₂	32	0,82 c	1,04 bc
Materia seca (kg planta ⁻¹)	Ag ₁₁	11	0,222 a	0,360 a
	Ag ₂₂	22	0,185 b	0,298 b
	Ag ₃₂	32	0,157 bc	0,261 bc
Rendimiento comercial (kg planta ⁻¹)	Ag ₁₁	11	7,88 a	4,94 a
	Ag ₂₂	22	7,42 ab	4,58 ab
	Ag ₃₂	32	6,61 bc	4,10 c
Eficiencia de uso de agua (kg m ⁻³)	Ag ₁₁	11	37,32 a	21,46 a
	Ag ₂₂	22	33,49 ab	20,84 ab
	Ag ₃₂	32	25,22 c	13,63 c

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Ag₁₁, Ag₂₂ y Ag₃₂ indican niveles de agotamiento del 11 %, 22 % y 32 %, respectivamente. / Different letters in the same column indicate significant differences between treatments ($p < 0,05$). Ag₁₁, Ag₂₂ and Ag₃₂ indicate 11 %, 22 %, and 32 % depletion levels, respectively.



Figura 2. Estructura, tamaño y volumen del dosel vegetal de plantas de **A.** tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y **B.** chile dulce (*Capsicum annuum* L.) en fibra de coco bajo distintos niveles de agotamiento hídrico en condiciones de invernadero. Laboratorio de Hortalizas, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Ag₁₁, Ag₂₂ y Ag₃₂ indican niveles de agotamiento del 11 %, 22 % y 32 %, respectivamente.

Figure 2. Structure, size, and canopy volume of **A.** tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and **B.** sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) plants grown in coir under different levels of water depletion in greenhouse conditions. Horticulture Laboratory, Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experiment Station, Alajuela, Costa Rica. 2021.

Ag₁₁, Ag₂₂, and Ag₃₂ indicate depletion levels of 11 %, 22 %, and 32 %, respectively.

Discusión

La magnitud del agotamiento hídrico, definida por las propiedades físico-hidráulicas del sustrato, determina el volumen y la frecuencia del riego, así como el patrón de aplicación del agua, lo que incide directamente en la dinámica de la humedad volumétrica (θ) (Abad et al., 2005; Hagen et al., 2014; Soto Bravo, 2018). A medida que disminuyó la θ , se redujo la conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$), lo cual explica la menor movilidad del agua en el perfil. Esta relación, caracterizada por una caída pronunciada de $K_{(\theta)}$ dentro del rango de agua fácilmente disponible, es común para sustratos hortícolas a base de fibra de coco (Londra et al., 2018; Price et al., 2008).

Al disminuir el contenido hídrico, se reduce la continuidad de los poros llenos de agua y aumenta la resistencia al flujo, lo que limita la movilidad del agua en el perfil (Conceição et al., 2014). La contracción del sustrato favorece la formación de canales preferenciales de escurrimiento, reduciendo la uniformidad en la distribución del agua y generando microzonas secas dentro del volumen radicular, como se observó en el tratamiento Ag₃₂. Este comportamiento dificulta el control de parámetros críticos como el pH y la conductividad eléctrica del sustrato, lo cual constituye una limitación en el manejo hídrico y nutricional de sistemas hidropónicos bajo condiciones de agotamiento elevado (Agrawal et al., 2020; Rosa-Rodríguez et al., 2018).

El descenso del pH con el aumento del agotamiento hídrico se atribuye a una mayor concentración de protones liberados por las raíces bajo condiciones de menor disponibilidad de agua. Este mecanismo, característico de situaciones de estrés moderado, permite mantener el equilibrio iónico en la rizosfera, aunque puede alterar

la disponibilidad de nutrientes esenciales. También refleja la importancia de la interacción adecuada entre la disponibilidad de agua, la concentración de sales y el pH, como se evidenció en el tratamiento Ag_{11} , factores determinantes de la estabilidad hídrica y química del sustrato que deben considerarse en conjunto en el manejo del riego en sistemas hidropónicos (Kudirka et al., 2023; Preciado et al., 2021).

El monitoreo continuo y conjunto de la conductividad eléctrica (CE) y el contenido de humedad volumétrica (θ) es fundamental para optimizar las estrategias de fertirriego. Este seguimiento permite interpretar la dinámica hídrica y nutrimental del sustrato, así como detectar la acumulación de sales que podría comprometer la estabilidad de los cultivos (Carrasco et al., 2007; Li et al., 2020). A medida que el sustrato se seca, la disponibilidad hídrica y la conductividad hidráulica del medio se reducen, alterando en consecuencia el equilibrio de sales disueltas (O'Meara et al., 2014).

Durante etapas de alta demanda hídrica, el incremento de la salinidad eleva el costo energético de la absorción de agua debido al efecto osmótico. Este fenómeno ocurre cuando la disminución del contenido de agua en el sustrato concentra los solutos en la solución nutritiva. En consecuencia, las plantas deben generar un mayor gradiente osmótico, lo que conlleva un gasto energético adicional que reduce las tasas de crecimiento y producción (Ding et al., 2022; Guo et al., 2022; Madugundu et al., 2023). Aunque el incremento en la salinidad no alcanzó niveles críticos, su tendencia sugiere la necesidad de evaluar estrategias de riego que mitiguen el efecto osmótico durante fases de alta demanda hídrica, particularmente en sistemas de cultivo intensivo.

La frecuencia de riego influye en la dinámica de disponibilidad de agua del sustrato entre riegos consecutivos. A niveles elevados de agotamiento hídrico, los riegos de mayor volumen y menor frecuencia modifican la disponibilidad de agua en la zona radicular. En estas condiciones, el agua disponible disminuye y, aunque los riegos voluminosos rehidratan el sustrato, generan amplias oscilaciones en la humedad radicular, alterando la conductividad hidráulica (Peng et al., 2020) y afectando la absorción de agua por las raíces (Fields et al., 2017). Este ajuste busca compensar la pérdida de humedad, pero puede provocar fluctuaciones en el estado hídrico de la rizosfera que comprometen la estabilidad fisiológica de las plantas y, en consecuencia, su eficiencia (Tan et al., 2021).

Un equilibrio adecuado entre la frecuencia y el volumen de riego, aplicado bajo un nivel balanceado de agotamiento como en el tratamiento Ag_{11} , mantiene niveles aceptables de humedad dentro del rango de agua fácilmente disponible en la rizosfera. Dicho equilibrio promueve una distribución relativamente uniforme del agua en el perfil, lo que permite mantener una alta eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes (Kormanek et al., 2023). Este tipo de manejo reduce el volumen de drenaje y, por tanto, la lixiviación de sales, lo cual favorece una adecuada retención de nutrientes en la matriz del sustrato (Gao et al., 2023; Jiang et al., 2024; Savvas et al., 2007).

La estabilidad en el rendimiento y la alta eficiencia en el uso del agua evidencian que la fibra de coco empleada proporcionó condiciones hidráulicas adecuadas para el crecimiento radicular y el mantenimiento de la evapotranspiración (Aladenola & Madramootoo, 2014; Khapte et al., 2019). Su granulometría equilibrada permitió un balance óptimo entre agua disponible y oxigenación, reduciendo el estrés hídrico incluso bajo déficit moderado (Londra et al., 2018). La selección del sustrato utilizado en la producción debe basarse en sus propiedades físico-hidráulicas, ya que una evaluación previa a la siembra posibilita definir su manejo y maximizar el rendimiento, especialmente en condiciones donde la disponibilidad de agua es limitada (Fields et al., 2017; Fields et al., 2018; Schulker et al., 2020).

En sistemas de riego controlado orientados a mejorar la eficiencia en el uso del agua, la selección de sustratos con alta retención de humedad útil y los valores elevados de conductividad hidráulica no saturada ($K_{(\theta)}$) favorecen un suministro hídrico eficiente y estable (Chowdhury et al., 2024). Este enfoque es crucial en escenarios de limitada disponibilidad de agua, donde se requiere un uso sostenible del recurso sin comprometer el rendimiento del cultivo. Lo anterior sugiere que la respuesta observada en el rendimiento se debió principalmente a la capacidad del sustrato para mantener un equilibrio hídrico adecuado durante los periodos de mayor demanda (Gizas et al., 2012; Ilahi et al., 2025).

La restricción en la disponibilidad de agua en la zona radicular limita la expansión foliar y reduce la tasa fotosintética. El menor crecimiento vegetativo y el rendimiento observados en los tratamientos con mayor agotamiento reflejan esta condición, que compromete la acumulación de materia seca y la translocación de fotoasimilados, reduciendo así la eficiencia fisiológica (Jung & Lee, 2023; Wu & Kubota, 2008). En contraste, los tratamientos con menor agotamiento favorecieron un crecimiento vegetativo vigoroso y un rendimiento comercial superior (Mukherjee et al., 2023; Ullah et al., 2021), asociados a una mayor capacidad hidráulica del sustrato y a un equilibrio entre agua disponible, aireación y conductividad eléctrica, lo cual optimizó la absorción de agua y nutrientes (Fields et al., 2017).

Los valores superiores de eficiencia en el uso del agua observados reflejan un balance más favorable entre el volumen aplicado y la biomasa o rendimiento obtenidos, lo que evidencia un aprovechamiento hídrico más sostenible (Rho et al., 2020). Aunque los resultados se alinean con lo esperado, las diferencias entre los dos cultivos sugieren una respuesta específica según la especie, mediada por rasgos morfofisiológicos propios frente a la reducción hídrica (Kou et al., 2022). La mayor resiliencia del tomate frente al chile dulce podría atribuirse a variaciones en su arquitectura radicular o a una mayor capacidad de ajuste osmótico, aspectos que merecen ser abordados con mayor profundidad en estudios posteriores (Gisbert-Mullor et al., 2023; Shabbir et al., 2020).

Los resultados sugieren la necesidad de profundizar en el estudio de la interacción entre niveles de agotamiento hídrico y las diferentes granulometrías y tipos de sustratos. Otro aspecto relevante por evaluar es la respuesta de cultivos de alto valor comercial bajo distintos déficits hídricos y condiciones de salinidad, considerando indicadores de rendimiento adicionales y calidad organoléptica y nutricional del fruto. Dichos estudios contribuirían a definir mejores estrategias de manejo del fertirriego, de tal forma que sean aplicables en distintos contextos productivos en Costa Rica.

Conclusiones

La definición de umbrales de agotamiento hídrico basada en las propiedades físico-hidráulicas de la fibra de coco permitió identificar condiciones de manejo hídrico que favorecieron un equilibrio entre disponibilidad de agua, aireación y conductividad hidráulica del sustrato. La programación del riego según la dinámica hídrica del sustrato promovió un ambiente apropiado para el flujo de agua y nutrientes en el perfil radicular de los cultivos de chile dulce y tomate bajo invernadero. En consecuencia, el ajuste del riego con base en la dinámica del sustrato mejoró la eficiencia en el uso del agua sin generar incrementos de salinidad que afectaran la productividad.

El nivel de agotamiento Ag_{11} presentó el balance funcional más adecuado entre retención de agua, aireación y estabilidad fisicoquímica del sustrato. Esta condición se reflejó en la estabilidad del rendimiento, en un mayor crecimiento y en un uso más eficiente del agua, mientras que niveles de agotamiento mayores redujeron el crecimiento y el desempeño agronómico de los cultivos. Los resultados proporcionan una base experimental para definir umbrales de riego y ajustar la programación del fertirriego en sistemas hidropónicos con fibra de coco bajo condiciones de invernadero en Costa Rica.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., & Noguera, V. (2002). Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology*, 83(3), 241-245. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00189-4](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00189-4)
- Abad, M., Fornes, F., Carrión, C., Noguera, V., Noguera, P., Maquieira, A., & Puchades, R. (2005). Physical properties of various coconut coir dusts compared to peat. *HortScience*, 40(7), 2138-2144. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.7.2138>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Norma UNE-EN 13041:2007. Métodos para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos de cultivo*.
- Agarwal, R. K., Tripathi, M. P., Verma, A., Sharma, G. L., & Khalkho, D. (2020). Hydroponic systems for cultivation of horticultural crops: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(6), 2083-2086. <https://www.phytojournal.com/archives?year=2020&vol=9&issue=6&ArticleId=13271>
- Aladenola, O., & Madramootoo, C. (2014). Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to variable irrigation. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(2), 303-310. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-048>
- Ansorena, M. J. (1994). *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Editorial Mundi-Prensa.
- Carrasco, G., Ramírez, P., & Vogel, H. (2007). Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. *Idesia*, 25(2), 59-62. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292007000200007>
- Castro, S., Aldrete, A., López, J., & Ordaz, V. (2019). Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino. *Madera y Bosques*, 25(2), Artículo ve2521520. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521520>
- Carlile, W., Cattivello, C., & Zacheo, P. (2015). Organic growing media: Constituents and properties. *Vadose Zone Journal*, 14(6), Artículo vzj2014-09. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.09.0125>
- Chowdhury, M., Espinoza-Ayala, A., Samarakoon, U. C., Altland, J. E., & Yang, T. (2024). Substrate Comparison for Tomato Propagation under Different Fertigation Protocols. *Agriculture*, 14(3), 382. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030382>
- Conceição, B. S., Lima, L. A., Sant'Ana, J. A. D. V., Silva, E. L. D., & Andrade, R. R. (2014). Difusividade e condutividade hidráulica não saturada de sustratos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 607-614. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600007>
- Di Rienzo, J. A., Guzmán, A. W., & Casanoves, F. (2002). A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 7, 129-142. <https://doi.org/10.1198/10857110260141193>
- Ding, X., Zhang, H., Qian, T., He, L., Jin, H., Zhou, Q., & Yu, J. (2022). Nutrient concentrations induced abiotic stresses to sweet pepper seedlings in hydroponic culture. *Plants*, 11(8), Artículo 1098. <https://doi.org/10.3390/plants11081098>
- Fields, J. S., Owen, J. S., & Scoggins, H. L. (2017). The influence of substrate hydraulic conductivity on plant water status of an ornamental container crop grown in suboptimal substrate water potentials. *Horticultural Science*, 52(10), 1419-1428. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11987-17>

- Fields, J. S., Owen, J. S., Altland, J. E., van Iersel, M. W., & Jackson, B. E. (2018). Soilless substrate hydrology can be engineered to influence plant water status for an ornamental containerized crop grown within optimal water potentials. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 143(4), 268-281. <https://doi.org/10.21273/JASHS04251-17>
- Gao, Y., Wang, H., Zhang, X., Li, J., & Liu, X. (2023). Effects of drought hardening and saline water irrigation on the growth, yield, and quality of tomato. *Agronomy*, 13(9), Artículo 2351. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092351>
- Giraldelli, M. A., Pereira, O. A., dos Santos, S. F., Brasil, M. A., & Pinheiro, S. K. T. (2020). Propriedade da fibra de coco: Uma revisão sistemática. *Uniciências*, 24(1), 34-38. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2020v24n1p34-38>
- Gisbert-Mullor, R., Martín-García, R., Bažon Zidarić, I., Pascual-Seva, N., Pascual, B., Padilla, Y. G., & López-Galarza, S. (2023). A water stress-tolerant pepper rootstock improves the behavior of pepper plants under deficit irrigation through root biomass distribution and physiological adaptation. *Horticulturae*, 9(3), Artículo 362. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030362>
- Gizas, G., Tsirogiannis, I., Bakea, M., Mantzos, N., & Savvas, D. (2012). Impact of hydraulic characteristics of raw or composted posidonia residues, coir, and their mixtures with pumice on root aeration, water availability, and yield in a lettuce crop. *Horticultural Science*, 47(7), 896-901. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.7.896>
- Gohardoust, M. R., Bar-Tal, A., Effati, M., & Tuller, M. (2020). Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy*, 10(9), Artículo 1403. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091403>
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(6), Artículo 298. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- Grunert, O., Hernandez-Sanabria, E., Vilchez-Vargas, R., Jauregui, R., Pieper, D. H., Perneel, M., & Boon, N. (2016). Mineral and organic growing media have distinct community structure, stability and functionality in soilless culture systems. *Scientific Reports*, 6(1), Artículo 18837. <https://doi.org/10.1038/srep18837>
- Guo, M., Wang, X. S., Guo, H. D., Bai, S. Y., Khan, A., Wang, X. M., & Li, J. S. (2022). Tomato salt tolerance mechanisms and their potential applications for fighting salinity: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, Artículo 949541. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949541>
- Hagen, E., Nambuthiri, S., Fulcher, A., & Geneve, R. (2014). Comparing substrate moisture-based daily water use and on-demand irrigation regimes for oakleaf hydrangea grown in two container sizes. *Scientia Horticulturae*, 179, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.008>
- Heller, H., Bar-Tal, A., Assouline, S., Narkis, K., Suryano, S., de la Forge, A., & Tsohar, D. (2015). The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: Lettuce as a case study. *Irrigation Science*, 33, 53-65. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0448-y>
- Ilahi, W. F. F., Rosdi, N. S. I., & Zainuddin, S. A. (2025). Estimating Unsaturated Hydraulic Conductivity of Cocopeat-Perlite Mixtures Using RETC Software. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science*, 13(1), 109-115. <https://doi.org/10.47253/jtrss.v13i1.1323>
- Incrocci, L., Thompson, R. B., Fernandez-Fernandez, M. D., De Pascale, S., Pardossi, A., Stanghellini, C., Roupheal, Y., & Gallardo, M. (2020). Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 242, Artículo 106393. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106393>

- Jiang, W., Liu, H., Wang, L., Chen, X., & Zhang, Y. (2024). Slightly saline water improved physiology, growth, and yield of tomato plants in yellow sand substrate. *Agronomy*, *14*(10), Artículo 2315. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102315>
- Jung, D. H., & Lee, J. W. (2023). Growth Characteristics of Bell Pepper and Tomato Hydroponically Cultivated in Growth Media Containing Different NaCl Concentrations in Raw Water on Reclaimed Lands. *Horticultural Science and Technology*, *41*(2), 164-176. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230016>
- Kabir, M. Y., Nambeesan, S. U., Bautista, J., & Díaz-Pérez, J. C. (2021). Effect of irrigation level on plant growth, physiology and fruit yield and quality in bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, *281*, Artículo 109902. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109902>
- Khapte, P. S., Kumar, P., Burman, U., & Kumar, P. (2019). Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. *Science Horticulturae*, *248*, 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.006>
- Kormanek, M., Małek, S., Banach, J., & Durło, G. (2023). Effect of changing substrate density and water application method on substrate physical properties and container-grown seedling growth. *Forests*, *14*(7), Artículo 1490. <https://doi.org/10.3390/f14071490>
- Kou, X., Han, W., & Kang, J. (2022). Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. *Frontiers in Plant Science*, *13*, Artículo 1085409. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085409>
- Kudirka, G., Viršilė, A., Sutulienė, R., Laužikė, K., & Samuolienė, G. (2023). Precise management of hydroponic nutrient solution pH: The effects of minor pH changes and MES buffer molarity on lettuce physiological properties. *Horticulturae*, *9*(7), Artículo 837. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9070837>
- Lakhiar, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T. N., Chauhdary, J. N., & Rakibuzzaman, M. (2024). A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. *Agriculture*, *14*(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
- Li, T., Bi, G., Zhao, X., Harkess, R. L., & Scagel, C. (2020). Nitrogen fertilization, container type, and irrigation frequency affect mineral nutrient uptake of hydrangea. *Water*, *12*(7), Artículo 1987. <https://doi.org/10.3390/w12071987>
- Liu, S., Qiang, X., Liu, H., Han, Q., Yi, P., Ning, H., Li, H., Wang, C., & Zhang, X. (2024). Effects of nutrient solution application rates on yield, quality, and water–fertilizer use efficiency on greenhouse tomatoes using grown-in coir. *Plants*, *13*(6), Artículo 893. <https://doi.org/10.3390/plants13060893>
- Londra, P. A. (2010). Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. *HortScience*, *45*(7), 1106-1112. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.7.1106>
- Londra, P., Paraskevopoulou, A., & Psychogiou, M. (2018). Hydrological behavior of peat-and coir-based substrates and their effect on begonia growth. *Water*, *10*(6), Artículo 722. <https://doi.org/10.3390/w10060722>
- López Marín, L. M. (2017). *Manual técnico del cultivo de tomate*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>
- Madriz Arrieta, J. (2023). *Manual de recomendaciones en el cultivo de chile dulce (Capsicum annuum L.)*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-9829.pdf>

- Madugundu, R., Al-Gaadi, K. A., Tola, E., Patil, V. C., & Sigrimis, N. (2023). The impact of salinity and nutrient regimes on the agro-morphological traits and water use efficiency of tomato under hydroponic conditions. *Applied Sciences*, *13*(17), Artículo 9564. <https://doi.org/10.3390/app13179564>
- Marfà, O., & Orozco, R. (1995). Non saturated hydraulic conductivity of perlites: Some effects on pepper. *Acta Horticulturae*, *401*, 235-242. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.401.28>
- Martínez-Rodríguez, O. G., Can-Chulim, A., Cruz-Crespo, E., & García-Paredes, J. D. (2017). Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(1), 53-65. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.71>
- Méndez-Cifuentes, A., Valdez-Aguilar, L. A., Cadena-Zapata, M., González-Fuentes, J. A., Hernández-Maruri, J. A., & Alvarado-Camarillo, D. (2020). Water and fertilizer use efficiency in subirrigated containerized tomato. *Water*, *12*(5), Artículo 1313. <https://doi.org/10.3390/w12051313>
- Möhring, N., Kudsk, P., Nistrup-Jørgensen, L., Erik-Ørum, J., & Finger, R. (2021). An R package to calculate potential environmental and human health risks from pesticide applications using the 'Pesticide Load' indicator applied in Denmark. *Computers and Electronics in Agriculture*, *191*, Artículo 106498. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106498>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, *12*(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Mukherjee, S., Dash, P. K., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. *Environmental Processes*, *10*(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z>
- O'Meara, L., Chappell, M. R., & van Iersel, M. W. (2014). Water use of *Hydrangea macrophylla* and *Gardenia jasminoides* in response to a gradually drying substrate. *HortScience*, *49*(4), 493-498. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.4.493>
- Papadimitriou, D. M., Daliakopoulos, I. N., Louloudakis, I., Savvidis, T. I., Sabathianakis, I., Savvas, D., & Manios, T. (2024). Impact of container geometry and hydraulic properties of coir dust, perlite, and their blends used as growing media, on growth, photosynthesis, and yield of Golden Thistle (*S. hispanicus* L.). *Scientia Horticulturae*, *323*, Artículo 112425. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112425>
- Park, S. T., Choi, K. Y., & Lee, Y. B. (2010). Water content characteristics of coconut coir substrates on different mixture ratios and irrigation rates and times. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, *28*(2), 227-233. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20103156686>
- Peng, Z., Smith, C., & Stovin, V. (2020). The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. *Journal of Hydrology*, *590*, Artículo 125273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125273>
- Plaza, B. M., Lao, M. T., & Jiménez-Becker, S. (2021). Fertigation strategies to alleviate fertilizer contamination generated by tomato crops under plastic greenhouses. *Agronomy*, *11*(3), Artículo 444. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030444>
- Price, J. S., Whittington, P. N., Elrick, D. E., Strack, M., Brunet, N., & Faux, E. (2008). A method to determine unsaturated hydraulic conductivity in living and undecomposed Sphagnum moss. *Soil Science Society of America Journal*, *72*(2), 487-491. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0111N>
- Preciado, P., Orozco-Santos, M., Ocampo-Velázquez, R. V., & Méndez-Gallegos, S. de J. (2021). Conductividad eléctrica de la solución nutritiva y su efecto en compuestos bioactivos y rendimiento de pimiento morrón (*Capsicum annuum*

- L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(52). <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/3375/1578>
- Rho, H., Colaizzi, P., Gray, J., Paetzold, L., Xue, Q., Patil, B., & Rush, C. (2020). Yields, fruit quality, and water use in a jalapeno pepper and tomatoes under open field and high-tunnel production systems in the Texas high plains. *Horticultural Science*, 55(10), 1632-1641. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15143-20>
- Rosa-Rodríguez, R. D. L., Lara-Herrera, A., Padilla-Bernal, L. E., Avelar-Mejía, J. J., & España-Luna, M. P. (2018). Proportion of drainage of the nutritive solution in the yield and quality of tomato in hydroponics. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 20, 4343-4353. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1003>
- Salazar, R., Rojano, A., & López, L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Water Technology and Science*, 5(2), 177-183. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/472>
- Savvas, D., Giotis, D., Chatzieustratiou, E., Bakea, M., & Patakioutas, G. (2007). Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural Water Management*, 91(1-3), 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.05.001>
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry—A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), 280-293. <https://doi.org/10.17660/EJHS.2018/83.5.2>
- Savvas, D., Giannothanasis, E., Ntanasi, T., Karavidas, I., & Ntatsi, G. (2023). State of the Art and New Technologies to Recycle the Fertigation Effluents in Closed Soilless Cropping Systems Aiming to Maximise Water and Nutrient Use Efficiency in Greenhouse Crops. *Agronomy*, 14(1), Artículo 61. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010061>
- Schulker, B. A., Jackson, B. E., Fonteno, W. C., Heitman, J. L., & Albano, J. P. (2020). Comparison of water capture efficiency through two irrigation techniques of three common greenhouse soilless substrate components. *Agronomy*, 10(9), Artículo 1389. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091389>
- Schulker, B. A., Jackson, B. E., Fonteno, W. C., Heitman, J. L., & Albano, J. P. (2021). Exploring substrate water capture in common greenhouse substrates through preconditioning and irrigation pulsing techniques. *Agronomy*, 11(7), Artículo 1355. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071355>
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2024). *Boletín Estadístico Agropecuario n.º 34: Serie cronológica 2020-2023*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BEA34.pdf>
- Shabbir, A., Mao, H., Ullah, I., Buttar, N. A., Ajmal, M., & Solangi, K. A. (2020). Improving water use efficiency by optimizing the root distribution patterns under varying drip emitter density and drought stress for cherry tomato. *Agronomy*, 11(1), Artículo 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010003>
- Soto Bravo, F. (2018). Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 42(2), 59-73. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i2.33779>
- Soto, F., Araya, E. A., & Ehandi, C. (2019). Efecto de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre parámetros de riego y rendimiento de chile dulce ‘Dulcítico’, en hidroponía bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 43-64. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.40001>
- Soto-Bravo, F., & Betancourt-Flores, A. (2022). Evaluación de metodologías para determinar las características físicas de un sustrato de fibra de coco. *Agronomía Costarricense*, 46(2). <https://doi.org/10.15517/rac.v46i2.52044>

- Tan, B., Li, Y., Liu, T., Tan, X., He, Y., You, X., & Li, L. (2021). Response of plant rhizosphere microenvironment to water management in soil-and substrate-based controlled environment agriculture (CEA) systems: A review. *Frontiers in Plant Science*, *12*, Artículo 691651. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.691651>
- Temnani, A., Berríos, P., Zapata-García, S., Espinosa, P. J., & Pérez-Pastor, A. (2023). Threshold values of plant water status for scheduling deficit irrigation in early apricot trees. *Agronomy*, *13*(9), Artículo 2344. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092344>
- Ullah, I., Mao, H., Rasool, G., Gao, H., Javed, Q., Sarwar, A., & Khan, M. I. (2021). Effect of deficit irrigation and reduced N fertilization on plant growth, root morphology and water use efficiency of tomato grown in soilless culture. *Agronomy*, *11*(2), Artículo 228. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020228>
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, *44*(5), 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Voogt, W., & Bar-Yosef, B. (2019). Water and nutrient management and crops response to nutrient solution recycling in soilless growing systems in greenhouses. En R. Raviv, & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (pp. 425-507). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63696-6.00010-4>
- Wu, M., & Kubota, C. (2008). Effects of electrical conductivity of hydroponic nutrient solution on leaf gas exchange of five greenhouse tomato cultivars. *HortTechnology*, *18*(2), 271-277. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.2.271>
- Yang, H., Bae, Y., Kim, Y., Hyeon, S., Choi, M., Yang, S., Kim, D., & Jang, D. (2024). Effects of irrigation methods on growth and water productivity in bell pepper cultivation in northern South Korea. *Horticulturae*, *10*(12), Artículo 1353. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121353>
- Yu, X., Zhang, J., Zhang, Y., Ma, L., Jiao, X., Zhao, M., & Li, J. (2023). Identification of optimal irrigation and fertilizer rates to balance yield, water and fertilizer productivity, and fruit quality in greenhouse tomatoes using TOPSIS. *Scientia Horticulturae*, *311*, Artículo 111829. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111829>