

Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica

Irrigation and nutrition management strategies in greenhouse hydroponic tomato: effect on yield and water efficiency

Freddy Soto-Bravo¹


Fecha de recepción: 5 de diciembre, 2024

Fecha de aprobación: 16 de abril, 2025

Soto-Bravo, F. Estrategias de manejo del riego y la nutrición en tomate hidropónico bajo invernadero: efecto en el rendimiento y la eficiencia hídrica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 38, Nº 4. Octubre-Diciembre, 2025. Pág. 170-181.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v38i4.7652>

1 Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0003-1959-9597>



Palabras clave

Eficiencia de uso de agua; fertiriego; balance hídrico; riego por demanda.

Resumen

En la agricultura actual, es urgente realizar un uso eficiente del agua y los fertilizantes, ante el desafío de abastecer la creciente demanda global de alimentos debido al acelerado crecimiento demográfico y la potencial crisis global del agua agravada por el cambio climático. En este sentido, se realizó un estudio en el cultivo de tomate hidropónico en invernadero, que incluyó seis tratamientos en un diseño bifactorial que combinaba tres niveles de nutrición (baja, media y alta) con dos estrategias de riego (riegos de menor volumen y mayor frecuencia; riegos de mayor volumen y menor frecuencia). Se evaluó volúmenes de riego y drenaje, evapotranspiración del cultivo (ET_c), conductividad eléctrica del drenaje (CE), humedad volumétrica en el sustrato (θ), peso seco (PS), área foliar (AF), el rendimiento de frutos total, comercial de distintas calidades y desecho y eficiencia de uso de agua (EUA). No hubo efecto de la interacción entre el nivel de nutrición y estrategia de riego para ninguna de las variables. Los tratamientos con nutrición media lograron la mayor EUA, asociada a una mayor producción de frutos comerciales de primera calidad, menor desecho y una menor ET_c en comparación con nutrición alta. En contraste, los tratamientos con alta concentración de nutrientes incrementaron la demanda hídrica y la CE del sustrato, lo que afectó negativamente el rendimiento y la EUA. La combinación de nutrición media con riego ajustado a la demanda del cultivo favoreció un mejor entorno radicular de humedad y salinidad, lo que la vez benefició un crecimiento vegetativo/productivo más equilibrado, que se reflejó en mayor rendimiento y calidad de fruto, y en EUA.

Keywords

Water use efficiency; fertirrigation; water balance; irrigation on demand.

Abstract

In modern agriculture, efficient use of water and fertilizers is imperative to meet the growing global demand for food driven by rapid population growth and the potential global water crisis exacerbated by climate change. This study was conducted on hydroponic tomato cultivation in a greenhouse, including six treatments that combined three levels of nutrition (low, medium, and high) and two irrigation strategies (lower volume with higher frequency and higher volume with lower frequency). Irrigation and drainage volumes, crop evapotranspiration (ET_c), drainage electrical conductivity (CE), volumetric humidity in the substrate (θ), dry weight (PS), leaf area (AF), total fruit yield, commercial yield of different qualities and waste, and water use efficiency (WUE) were evaluated. There was no effect of the interaction between the level of nutrition and irrigation strategy for any of the variables. Treatments with optimal nutrition achieved the highest WUE, associated with a higher production of commercial first-quality fruits, less waste, and a reduced ET_c compared to high nutrition. In contrast, treatments with high nutrient concentrations increased water demand and substrate EC, negatively affecting yield and WUE. The combination of medium nutrition with irrigation adjusted to crop demand favored a better root environment of humidity and salinity, which in turn benefited a more balanced vegetative/productive growth, which was reflected in higher yield and fruit quality, and in the EUA.

Introducción

El manejo integrado del riego y la nutrición en sistemas hidropónicos bajo invernadero es esencial para lograr un equilibrio adecuado entre el crecimiento vegetativo y reproductivo del cultivo, lo cual se traduce en un mayor rendimiento y mejor calidad de los frutos [1]. Dicho balance es crítico en cultivos de alta demanda nutricional como el tomate (*Solanum lycopersicum*), una de las hortalizas de mayor producción y consumo a nivel mundial. Para esto, es fundamental la precisión en las aplicaciones de agua y nutrientes, según los requerimientos y las condiciones climáticas específicas del cultivo, especialmente ante el desafío de satisfacer la demanda global de productos agrícolas de alta calidad [2].

La producción de tomate hidropónico en invernaderos enfrenta desafíos significativos en la optimización del uso del agua y de los fertilizantes, elementos críticos para aumentar la productividad y sostenibilidad del cultivo. A pesar de los avances tecnológicos en fertiriego, persisten vacíos de conocimiento sobre la interacción entre las estrategias de manejo del riego y diferentes niveles de nutrición, aspecto fundamental para comprender y mejorar la eficiencia del uso de recursos hídricos y minerales [3]. Un manejo inadecuado del ferti-riego puede conducir al uso ineficiente de estos recursos, impactando negativamente la productividad y elevando el impacto ambiental, especialmente en sistemas cerrados como los cultivos hidropónicos [4].

El sustrato de fibra de coco, comúnmente utilizado en tomate hidropónico, presenta desafíos específicos relacionados con la salinidad y la retención de humedad, ya que pueden influir en la absorción de nutrientes y en el rendimiento del cultivo. La falta de estudios que aborden integralmente estas interacciones recalca la necesidad de desarrollar y validar prácticas de manejo del riego y la nutrición que sean sostenibles y eficientes [5]. En este sentido, diversos estudios han subrayado que un ajuste preciso del riego y la fertilización puede mejorar significativamente las eficiencias de uso de agua y de fertilizantes, así como el rendimiento y la calidad de los frutos [6]. La importancia de este estudio radica en la necesidad de desarrollar estrategias de fertiriego que optimicen el rendimiento y minimicen el impacto ambiental, contribuyendo así a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del incremento en la concentración de nutrientes en función de dos estrategias de manejo del riego, sobre variables de manejo del ferti-riego, eficiencia hídrica y el rendimiento en el cultivo de tomate hidropónico en fibra de coco bajo invernadero.

Materiales y métodos

La investigación tuvo lugar de junio a noviembre de 2018 en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno en San José de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N, 84° 16' O, 840 msnm), con promedios anuales de 22°C de temperatura, 78% de humedad relativa y 1940 mm de precipitación. Se cultivó en un invernadero multitúnel hecho de hierro galvanizado con polietileno transparente de 200 μm y malla anti-insectos de 43 mesh en las paredes. La ventilación fue pasiva a través de paredes laterales y ventanas cenitales automatizadas, las cuales eran gestionadas por sensores de velocidad del viento y de lluvia.

Durante el experimento, se registró la radiación solar total (Piranómetro LI-COR Mod. LI-200SA), la temperatura y la humedad relativa (VAISALA Modelo HMP-35C). La integral de radiación solar diaria varió de 12,67 a 47,8 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, con una media de 29,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Los promedios globales de máximas, mínimas y promedios, en el mismo orden, fueron 37,5, 16,4 y 25,1 °C para temperatura y de 100%, 28,9% y 72,7% para humedad relativa.

Se utilizó un sistema de cultivo hidropónico en tablas de fibra de coco (28,8 L), cuyas características físicas se determinaron según metodología UNE-EN-13041-2007 [7]. Dicho sustrato presentó una capacidad de retención de humedad de 61% a capacidad de contenedor (CC) y de 32 % en punto de marchitez permanente (PMP) para un agua total disponible del 28% y una capacidad de aireación del 29 %.

Se utilizó el híbrido de tomate Gladiador con hábito de crecimiento indeterminado, altos rendimientos de frutos de buen tamaño, larga vida poscosecha, y resistencia a *Verticillium sp*, *Fusarium* raza 1 y 2 y al virus TYLCV. El trasplante se realizó a los 35 días después de la siembra, cuando las plántulas tenían entre 5 - 6 hojas verdaderas, colocando tres plantas por tabla de fibra de coco con distancias de 0,33 m entre plantas y 1,5 m entre hileras (2 plantas m²).

Se evaluaron seis tratamientos que combinaron dos estrategias de manejo del riego: E₁) menor volumen y mayor frecuencia y E₂) mayor volumen y menor frecuencia; con tres niveles de nutrición según conductividad eléctrica: bajo (B: 1,0 dS m⁻¹), medio (M: 2,0 dS m⁻¹) y alto (A: 3,0 dS m⁻¹) concentración de nutrientes (Cuadro 1). Los tratamientos de riego y nutrición se iniciaron a partir de la quinta semana de cultivo. Para definir los niveles de nutrición se utilizó como referencia una solución nutritiva considerada media (M) validada desde 2016 en el Programa de Hortalizas de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit-UCR. Los niveles de nutrición bajo (B) y alto (A) correspondieron a una reducción y un incremento del 50% de la solución media (M), manteniendo constante la proporción de nutrientes en todas las soluciones de los tres niveles de nutrición.

Cuadro 1. Tratamientos con dos estrategias de manejo del riego y tres niveles de nutrición en un cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero.

Tratamiento combinado	Estrategia de manejo del riego	Nivel de nutrición	
		Concentración	CE (dS m ⁻¹)
E ₁ B	E ₁ : Menor volumen y mayor frecuencia	Baja (B)	1,0
E ₁ M		Media (M)	2,0
E ₁ A		Alta (A)	3,0
E ₂ B	E ₂ : Mayor volumen y menor frecuencia	Baja (B)	1,0
E ₂ M		Media (M)	2,0
E ₂ A		Alta (A)	3,0

Se utilizó un sistema de riego por goteo compuesto por válvulas solenoides, tuberías de polietileno con goteros antidrenantes y autocompensados (2 L h⁻¹). Los volúmenes de riego se estimaron basados en un porcentaje de agotamiento hídrico del agua total disponible (ATD) en el sustrato: 15% para E₁ y 30% para E₂, que correspondieron a valores de humedad del sustrato (θ) de 74% en E₁ y 70% en E₂. La activación del riego se realizaba automáticamente por medio de un sistema de riego a la demanda (SRD) que consistió en un algoritmo alimentado con datos en tiempo real de un caudalímetro (ARAD, mod. SF), un pluviómetro (ICT ECRN-100) y un sensor de humedad (Decagon, Mod. GS3). Cuando la θ disminuía hasta los valores de consigna establecidos para la E₁ y E₂, el algoritmo activaba el riego para reponer los volúmenes de agua estimados y obtener el porcentaje de drenaje deseado.

Para evaluar el efecto de los tratamientos se midieron las siguientes variables: volúmenes de riego, drenaje y evapotranspiración del cultivo (ET_c); conductividad eléctrica en drenaje (CE) y humedad volumétrica (θ) en el sustrato, peso seco (PS), área foliar (AF), rendimiento y eficiencia en el uso del agua (EUA).

La ET_c se estimó por medio de balance hídrico en el sustrato [8] a partir de los volúmenes ($L\ m^{-2}$) de riego (R) y drenaje (D), y la diferencia entre los contenidos de humedad volumétrica del sustrato ($\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$) al inicio (θ_i) y al final (θ_f) de un periodo semanal.

$$ET_c = R - D \pm \Delta\theta \quad (1)$$

La conductividad eléctrica (CE) en el drenaje fue medida semanalmente con conductivímetro (HANNA Mod. HI98129) en submuestras recolectadas desde una bandeja para recolección de drenajes. La eficiencia en el uso del agua (EUA) se obtuvo como el cociente entre el rendimiento comercial ($Rc: kg\ m^{-2}$) y la evapotranspiración del cultivo ($ET_c: m^3\ m^{-2}$) [1].

$$EUA = \frac{RC}{ET_c} \quad (2)$$

El PS ($g\ m^{-2}$) y el AF ($m^2\ planta^{-1}$) se evaluaron al final del ciclo en tres plantas por repetición. El PS se determinó en horno a $70\ ^\circ C$ hasta peso constante y el AF se cuantificó utilizando un medidor de área foliar (LI-COR MODEL 3100). El rendimiento de frutos ($kg\ planta^{-1}$) se cuantificó en 10 plantas por repetición, para un total de 30 plantas por tratamiento, con un grado de madurez entre pintón (30% rojo) y maduro (100% rojo). El rendimiento comercial se clasificó en tres categorías de frutos [9] en primera ($> 119\ g$), segunda (86 - 118 g) y tercera calidad (51 - 85 g). Además, se cuantificaron los frutos de desecho ($< 51\ g$) con daños físicos y mecánicos. El rendimiento total de frutos se obtuvo como la suma del rendimiento comercial más el desecho.

El experimento consistió en seis tratamientos distribuidos en un diseño irrestricto al azar con arreglo bifactorial (3×2) que combinaba dos estrategias de manejo del riego (E_1 y E_2) con tres niveles de nutrición (B, M y A), con tres repeticiones conformadas por 3 hileras de 5 tablas de fibra de coco con 3 plantas por tabla para un total de 45 plantas/repetición.

Los datos fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad para verificar los supuestos del análisis de varianza (ANDEVA). Una vez verificados los supuestos, se realizó el ANDEVA utilizando el software estadístico Infostat para determinar la posible existencia de interacción o efectos independientes entre los factores [10]. Cuando se identificó interacción entre los factores de riego y nutrición, se analizaron los efectos simples de los tratamientos mediante una comparación múltiple de medias (Tukey $P < 0,05$). Cuando no hubo interacción ($P > 0,05$) se analizaron los efectos independientes de cada factor mediante la comparación múltiple de medias (Tukey $P < 0,05$).

Resultados y discusión

Balance Hídrico

El nivel de nutrición fue el único factor con efecto significativo ($P < 0,05$) sobre los componentes del balance hídrico en el sistema de cultivo, donde se observó que a medida que incrementó la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, también aumentaron los volúmenes de riego y de ET_c (Fig. 1).

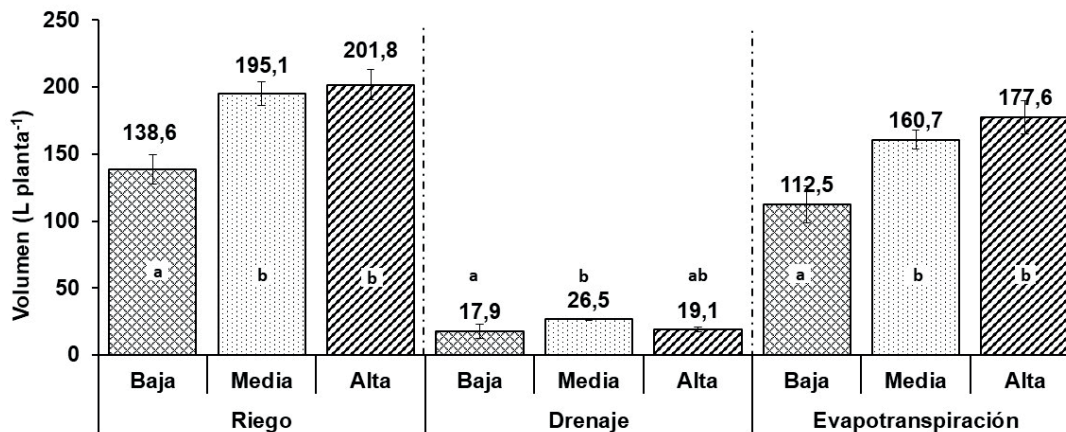


Figura 1. Componentes del balance hídrico ($L \text{ planta}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$): riego, evapotranspiración (ET_c) y drenaje en un sistema de cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero, con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva. Para cada variable, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P < 0,05$).

Los tratamientos con nutrición media y alta mostraron volúmenes de riego y de ET_c similares, y a la vez significativamente superiores ($P < 0,05$) al tratamiento con nutrición baja. Estas diferencias evidenciaron que a mayores concentraciones de nutrientes, aumenta la demanda de agua para mantener el equilibrio hídrico en la planta, prevenir la salinización del sustrato y asegurar una adecuada absorción de nutrientes [11].

Este comportamiento en el balance hídrico estuvo estrechamente relacionado con parámetros morfológicos del cultivo, donde el AF y el PS aumentaron significativamente ($P < 0,05$) conforme incrementó el nivel de nutrición (Fig. 2).

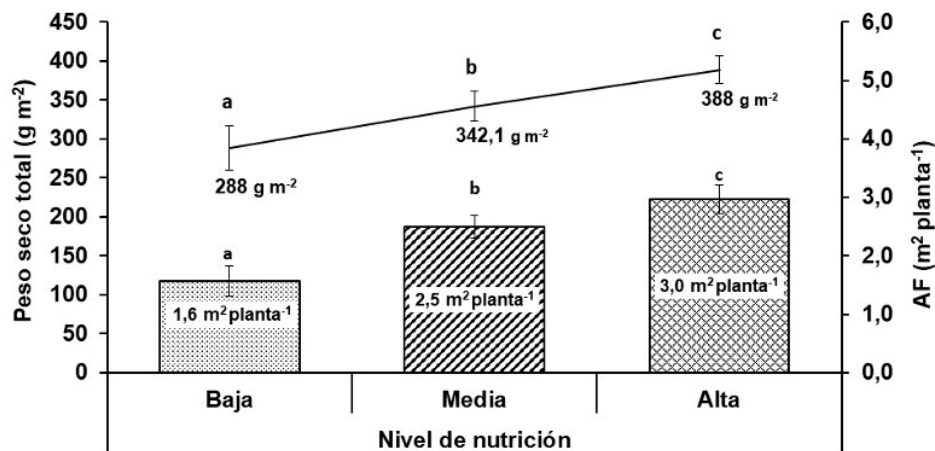


Figura 2. Peso seco y área foliar (AF) con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada variable, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P < 0,05$).

Asimismo, un mayor crecimiento estuvo directamente asociado a una mayor transpiración, principal componente de la ET_c en cultivos hidropónicos donde la evaporación es mínima. Una mayor AF incrementó la transpiración debido a una mayor área expuesta al intercambio de agua con la atmósfera, elevando así la demanda hídrica del cultivo [12]. Muchos estudios han demostrado la relación entre el aporte de nutrientes y la creciente necesidad de agua

en los cultivos, asociado al incremento del AF, por ejemplo, altos aportes de nitrógeno y de riego aceleran la actividad fisiológica del cultivo, incrementando la demanda hídrica [13]. En contraste, la reducción en la fertilización combinada con riego deficitario ha demostrado disminuir la demanda hídrica relacionado con un menor crecimiento vegetativo lo que puede afectar el rendimiento [14], tal como sucedió en el presente estudio.

La gestión adecuada del riego y la nutrición es esencial para optimizar la ET_c en cultivos de tomate hidropónico en invernadero. Aunque los volúmenes de riego en los tratamientos con nutrición media y alta fueron comparables, el volumen de drenaje fue significativamente mayor ($P < 0,05$) con nutrición media ($26,5 \text{ L planta}^{-1}$), atribuible a una menor ET_c relacionada con una menor AF. Esta situación favoreció un crecimiento más equilibrado entre fuente/sumidero, reflejado en un adecuado balance entre el aporte de nutrientes y la demanda de agua, y previniendo la acumulación de sales en el sustrato por el efecto de lavado. Aunado a lo anterior, la mayor demanda hídrica con nutrición alta como resultado de un mayor crecimiento ($>AF$ y PS), resalta la necesidad de un manejo cuidadoso del riego y la nutrición para evitar el exceso de drenaje y la lixiviación de nutrientes, para garantizar un uso eficiente del agua y los fertilizantes [6].

La tendencia a incrementar la ET_c conforme aumentó el nivel de nutrición, requiere riegos más frecuentes para evitar la salinización del sustrato. Diferentes estudios han demostrado que un correcto aporte de riego para garantizar un adecuado drenaje, junto con un aporte preciso de nutrientes, contribuye a mantener niveles estables de CE en el sustrato [15]. Por tal razón, aunque el incremento en el nivel de nutrición acrecentó la ET_c , el tratamiento con nutrición media mantuvo una adecuada CE en el drenaje, lo que benefició un balanceado crecimiento del cultivo, mejorando el rendimiento y la EUA. Dichos resultados evidencian que la gestión precisa del riego y la nutrición, son factores decisivos para evitar la lixiviación de nutrientes, lo que podría comprometer la eficiencia en el uso de dichos recursos y consecuentemente la calidad del cultivo [6].

Humedad volumétrica (θ) y conductividad eléctrica (CE) en drenaje

Ambas variables del manejo del riego fueron afectadas exclusivamente por el nivel de nutrición, mostrando una tendencia al incremento conforme aumentó la concentración de nutrientes en la solución nutritiva (Fig. 3).

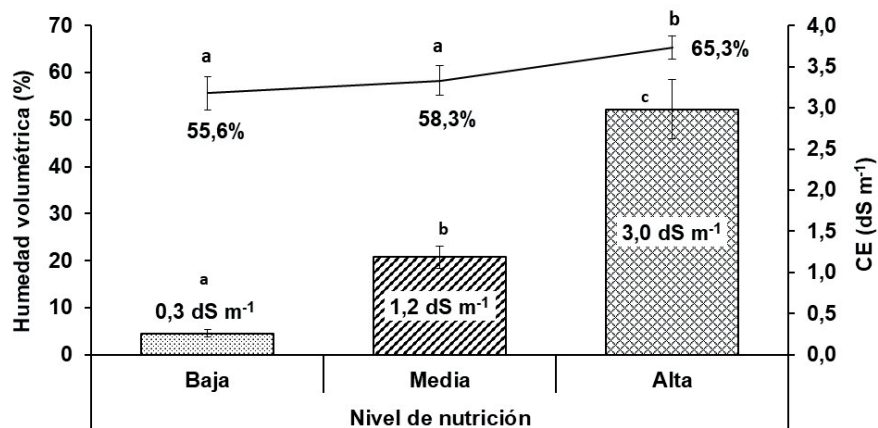


Figura 3. Humedad volumétrica en el sustrato y conductividad eléctrica (CE) en el drenaje, con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada variable, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre niveles de nutrición (Tukey, $P < 0,05$).

El comportamiento de la relación entre la θ y la CE en el sustrato explica en gran parte, como influencia el manejo del ferti-riego la dinámica del agua y los nutrientes en el medio de cultivo, en la continua interacción sustrato-planta-clima. Mantener un balance adecuado de θ y CE es determinante para evitar la salinización del sustrato, maximizar la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes y mejorar la productividad de los cultivos [16]. La gestión precisa de estos parámetros no solo mejora la utilización de recursos, sino que también minimiza los riesgos asociados a la salinización, optimizando el rendimiento del cultivo [16]. Coincidiendo con estos hallazgos, Aslan *et al.*, [17] demostraron que niveles altos de nutrición aumentan significativamente el contenido de θ en comparación con bajos aportes de nutrientes, debido a un mayor efecto osmótico causado por la acumulación progresiva de sales minerales en el sustrato, lo que puede limitar la ET_c y afectar el equilibrio hídrico en sistemas hidropónicos. Aunque un mayor contenido de θ podría parecer beneficioso, este efecto positivo puede verse contrarrestado por la salinidad excesiva, ya que compromete la absorción de agua y de nutrientes por las raíces, lo que puede afectar negativamente el rendimiento del cultivo [18].

En este contexto, los tratamientos con nutrición alta mostraron mayores valores de CE en el drenaje, reflejando los efectos negativos de la acumulación de nutrientes. Altos niveles de CE en el sustrato generan un entorno osmótico adverso, disminuyendo el potencial osmótico y la conductividad en las raíces, lo que conduce a una menor absorción hídrica y nutricional, que puede inducir a estrés hídrico [19], [20].

Finalmente, la alta salinidad en el sustrato afecta negativamente la capacidad de almacenamiento de agua ya que provoca la compactación del sustrato, lo que reduce su porosidad [21] que a la vez limita la capacidad de aireación y retención de humedad, afectando así la disponibilidad de agua para las plantas. Estos hallazgos refuerzan la importancia de un manejo preciso y equilibrado del riego y la nutrición en sistemas hidropónicos, especialmente en condiciones de alta salinidad, para mantener un entorno radicular óptimo que asegure un equilibrio hídrico adecuado y optimice el crecimiento y rendimiento del cultivo de tomate [22].

Rendimiento

En este estudio, únicamente el nivel de nutrición afectó ($P < 0,05$) todos los componentes del rendimiento, excepto para los frutos de tercera calidad, donde no se observaron efectos independientes ni interacción entre los factores. Los tratamientos con nutrición baja registraron el menor rendimiento en todas las categorías de frutos. El rendimiento total fue similar entre los niveles de nutrición media y alta, con un promedio de 5 kg planta^{-1} (10 kg m^{-2}). Sin embargo, la regulación del riego mediante el sistema SRD, ajustado a las condiciones del dosel vegetal y el clima, junto con una concentración media de nutrientes, favoreció un mayor rendimiento en frutos de primera calidad y una menor producción de frutos de tercera calidad y desecho, en contraste con los resultados obtenidos en los tratamientos con nutrición alta (Fig. 4). En el cultivo de tomate en fibra de coco en invernadero, Liu *et al.*, [5] evaluó diferentes tasas de aplicación de soluciones nutritivas, reportando rendimientos totales ligeramente inferiores ($4,3$ a $6,17 \text{ kg m}^{-2}$) a una densidad de siembra ($2,5 \text{ plantas m}^{-2}$) a la del presente estudio.

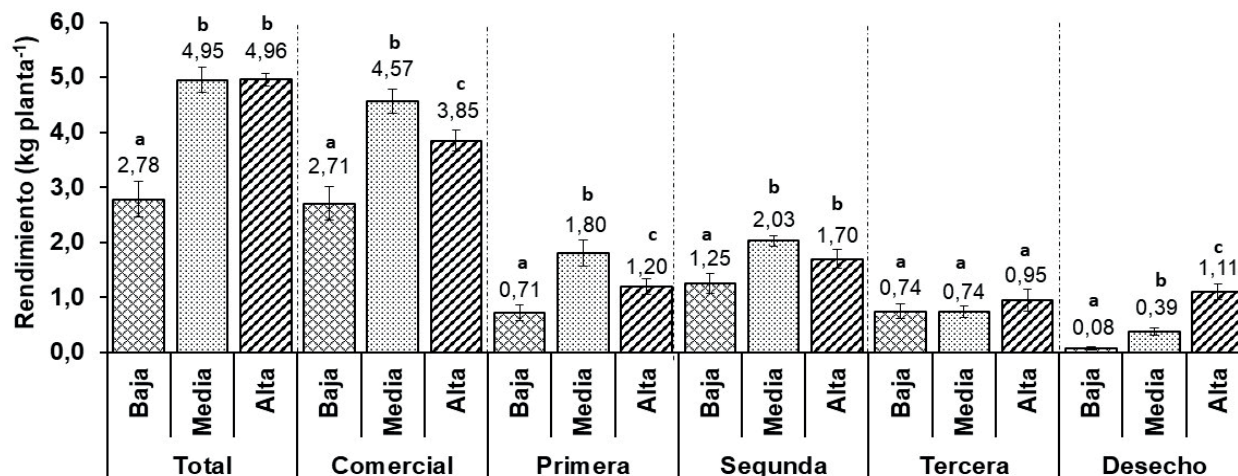


Figura 4. Rendimiento de frutos (kg planta⁻¹) total, comercial, de primera, segunda y tercera calidad y desecho, con baja, óptima y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva en el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Alajuela, Costa Rica. Para cada categoría de frutos, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, P<0,05).

Uno de los mayores efectos de altos niveles de nutrición es la acumulación de sales que generan altas CE en el medio de cultivo [23], [24], [25]. Al respecto, Nasir y Sato encontraron que niveles de CE entre 1,2 y 1,4 dS m⁻¹ en solución nutritiva mejoraron el rendimiento y la calidad de los frutos en cultivo de tomate hidropónico; valores de CE bajos (0,8–1,0 dS m⁻¹) limitaron el rendimiento debido a una insuficiente disponibilidad de nutrientes, mientras que valores altos (>1,4 dS m⁻¹) podrían haber inducido estrés salino [23]. De forma similar, se identificó que concentraciones elevadas de nutrientes en solución nutritiva redujeron significativamente la calidad y el rendimiento de frutos de tomate cherry, asociando la alta CE (2,9 dS m⁻¹) en el sustrato a deficiencias de calcio que aumentó el porcentaje de frutos de desecho [24], [25].

Eficiencia de uso de agua (EUA)

La EUA no fue afectada (P>0,05) por la interacción entre la estrategia de manejo del riego y el nivel de nutrición. No obstante, el nivel de nutrición afectó significativamente (P<0,05) la EUA para la mayoría de las categorías de frutos, excepto para los frutos de segunda calidad (Fig. 5).

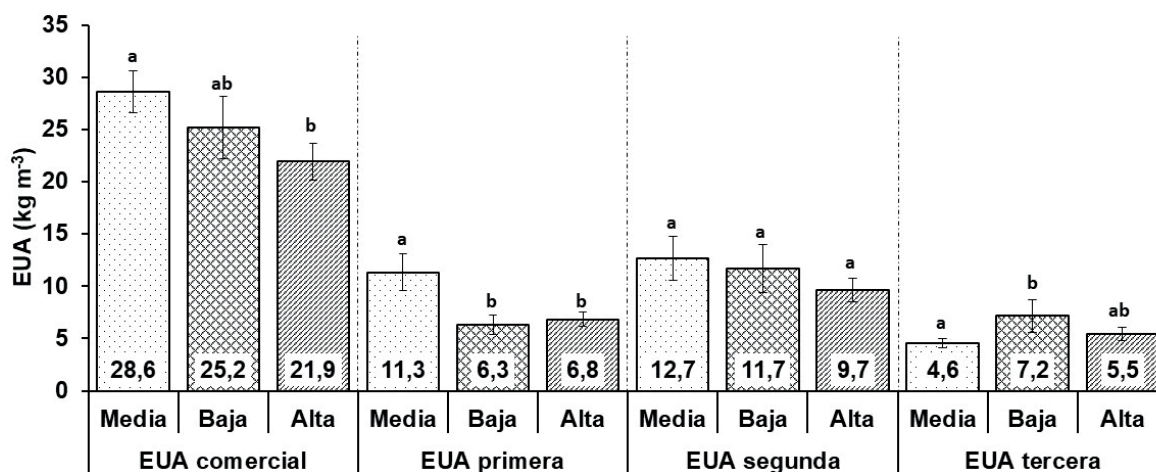


Figura 5. Eficiencia de uso de agua (EUA) en producción de frutos de calidad comercial, primera, segunda y tercera, en tratamientos con baja, media y alta concentración de nutrientes en solución nutritiva, en un cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Para cada categoría de frutos, letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre niveles de nutrición (Tukey, P<0,05).

La EUA para producción de fruto comercial total y de primera calidad fue superior ($P < 0,05$) bajo nutrición media ($28,6 \text{ kg m}^{-3}$) en comparación con los tratamientos de nutrición alta y baja, que no mostraron diferencias significativas entre sí, con un promedio de $23,5 \text{ kg m}^{-3}$. Al mismo tiempo, la nutrición media resultó en la menor EUA para frutos de tercera calidad. Esto indica que tanto la nutrición deficiente como la excesiva, afectaron negativamente la EUA para la producción de frutos de alta calidad, mientras que promovieron un incremento en la EUA de frutos de tercera calidad (promedio: $6,3 \text{ kg m}^{-3}$), probablemente relacionado con valores elevados de CE y el consecuente estrés osmótico que limitó la absorción de agua y nutrientes. Los resultados demostraron que la EUA para la producción de frutos comerciales y de primera calidad es altamente sensible al manejo de la nutrición, evidenciando la importancia de ajustar las estrategias de manejo del riego y la nutrición para optimizar la demanda hídrica (ET_c), incrementar los rendimientos y, en consecuencia, mejorar la EUA..

La EUA es un parámetro decisivo para valorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Numerosos estudios han confirmado la importancia de un adecuado aporte de nutrientes junto a un manejo preciso del riego para maximizar la EUA [5], [6], donde el uso de tecnologías tales como el manejo del riego por goteo automatizado con sensores en tiempo real han demostrado una mejora sensible en la EUA en los cultivos [26], [27]. Por ejemplo, la fertirrigación inteligente con recirculación y reutilización de drenajes incrementa significativamente la EUA [27], [28].

En el presente estudio, el tratamiento con nutrición media con riego ajustado automáticamente según la demanda del cultivo obtuvo una EUA de $28,6 \text{ kg m}^{-3}$. Comparado con sistemas de cultivo de tomate en suelo bajo invernadero con riegos deficitarios, Wu et al., reportaron valores inferiores ($22,9$ a $25,12 \text{ kg m}^{-3}$) [28]. En cultivos de tomate en suelo a campo abierto, Mendez et al., reportaron valores de EUA entre $7,3$ a $22,1 \text{ kg m}^{-3}$ (México) y de $7,4$ a $17,0 \text{ kg m}^{-3}$ (costa mediterránea) [6], valores inferiores a los obtenidos en la presente investigación. Dichas diferencias podrían asociarse a las ventajas comparativas que ofrece el cultivo en sustratos bajo invernadero, donde el uso de sistemas de riego a la demanda del cultivo reduce las pérdidas de agua y nutrientes por lixiviación e incrementa la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas.

Las interrelaciones entre el balance hídrico, el manejo del ferti-riego y las características morfológicas del cultivo tales como el IAF y el PS, fueron determinantes en la ET_c y la EUA del tomate. Aunque el rendimiento fue menor con nutrición baja, la EUA fue alta debido a una menor demanda hídrica debido a un menor crecimiento vegetativo reflejado en menor AF y PS. En contraste, el tratamiento con alta nutrición elevó la conductividad eléctrica (CE) en el sustrato, lo cual tuvo un efecto osmótico negativo, dificultando la absorción de agua y nutrientes, y reduciendo el rendimiento y la EUA.

Conclusión

El manejo del riego automatizado según la demanda del cultivo junto con un nivel de nutrición media mejoró el rendimiento y calidad de frutos al favorecer niveles óptimos de humedad y salinidad en el sustrato de fibra de coco del cultivo de tomate bajo invernadero. De esta forma, la combinación de un nivel de nutrición medio con un control riguroso del riego ajustado a la demanda superó significativamente en eficiencia de uso del agua ($28,8 \text{ kg m}^{-3}$) a los tratamientos con nutrición alta y baja, independientemente de la estrategia de riego utilizada. Con nutrición media y riego a la demanda, la relación entre el rendimiento comercial ($5,0 \text{ kg planta}^{-1}$), la ET_c ($160 \text{ L planta}^{-1}$) y el volumen de drenaje ($26,5 \text{ L planta}^{-1}$), evidenció un balance hídrico adecuado entre sustrato, planta y clima. Consecuentemente, favoreció un adecuado nivel de humedad y drenaje que previno la salinización del sustrato, reflejado en menores valores de conductividad eléctrica ($1,2 \text{ dS m}^{-1}$). Esta interacción entre humedad y conductividad eléctrica

en el sustrato favoreció un entorno radicular óptimo, que a su vez promovió un crecimiento equilibrado entre fuente y sumidero, que potenció tanto el rendimiento en fruto de mayor calidad como la eficiencia en el uso del agua.

Referencias

- [1] F. Soto-Bravo, A. Betancourt-Flores, "Comportamiento vegetativo-generativo de tomate y chile dulce hidropónico en invernadero, sometidos a agotamiento hídrico," *Agronomía Costarricense*, vol. 47, no. 1, pp. 09-26, 2024.
- [2] H. J. Muhasin, A. Y. Gheni, N. I. I. Tajuddin, N. A. Izni, Y. Y. Jusoh y K. A. Aziz, "A systematic literature review for smart hydroponic system," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 1, pp. 1–10, 2024. DOI: 10.11591/eei.v13i1.4738.
- [3] F. Tran, J. Holland, N. Quesada, M. Young, D. Bienkowski, D. Savvas et al., "What evidence exists on the effectiveness of the techniques and management approaches used to improve the productivity of field-grown tomatoes under conditions of water-, nitrogen- and/or phosphorus-deficit? A systematic map," *Environmental Evidence*, vol. 10, pp. 1-17, 2021. DOI: 10.1186/s13750-021-00229-9.
- [4] H. Li, X. Mei, J. Wang, F. Huang, W. Hao, y B. Li, "Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China," *Agricultural Water Management*, vol. 244, pp. 106534, 2021. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2020.106534.
- [5] S. Liu, X. Qiang, H. Liu, Q. Han, P. Yi, H. Ning, H. Li, C. Wang y X. Zhang, "Effects of nutrient solution application rates on yield, quality, and water–fertilizer use efficiency on greenhouse tomatoes using grown-in coir," *Plants*, vol. 13, pp. 1–20, 2024. DOI: 10.3390/plants13060893.
- [6] H. Méndez, R. Pertierra, y C. Balmaseda, "Eficiencia del agua en tomate cultivado en sustrato inerte," *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 10, no. 2, pp. 23–34, 2023, doi: 10.26423/rctu.v10i2.753.
- [7] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), "UNE-EN 13041: Mejoradores de suelos y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: Densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total," Madrid, España, AENOR. 2007.
- [8] F. Soto-Bravo y Rodríguez-Ocampo, "Crecimiento, evapotranspiración y uso de nutrientes en cultivo hidropónico de *Eryngium foetidum*, en dos diferentes ambientes y niveles de nutrición," *Agronomía Costarricense*, vol. 46, no. 1, pp. 09-26, 2021.
- [9] Quesada, G, "Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato," *Agronomía Costarricense* vol. 39, no. 1, pp. 25-36, 2015.
- [10] J. A. Di Rienzo, A. W. Guzmán, F. Casanoves, "InfoStat, versión 2012," Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 2002
- [11] U. Shareef, A. U. Rehman, y R. Ahmad, "A systematic literature review on parameters optimization for smart hydroponic systems," *AI*, vol. 5, no. 3, pp. 73–85, 2024. DOI: 10.3390/ai5030073.
- [12] S. Guo, L. Wu, X. Cao, X. Sun, Y. Cao, Y. Li y H. Shi, "Simulation Model Construction of Plant Height and Leaf Area Index Based on the Overground Weight of Greenhouse Tomato: Device Development and Application," *Horticulturae*, vol. 10, no. 3, pp. 270, 2024. DOI: 10.3390/horticulturae10030270.
- [13] X. Wang, J. Yun, P. Shi, Z. Li, P. Li, y Y. Xing, "Root growth, fruit yield and water use efficiency of greenhouse grown tomato under different irrigation regimes and nitrogen levels," *Journal of Plant Growth Regulation*, vol. 38, pp. 400–415, 2019. DOI: 10.1007/s00344-018-9850-7.
- [14] X. Gong, R. Qiu, J. Sun, J. Ge, L. Yanbin, y S. Wang, "Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation," *Agricultural Water Management*, vol. 235, pp. 106154, 2020. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106154.
- [15] D. Neocleous y D. Savvas, "Validating a smart nutrient solution replenishment strategy to save water and nutrients in hydroponic crops," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, pp. 1–12, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.965964.
- [16] T. Ahn, J.-S. Yang, S. Park, H. W. Moon, y J. Y. Lee, "Translation of irrigation, drainage, and electrical conductivity data in a soilless culture system into plant growth information for the development of an online indicator related to plant nutritional aspects," *Agronomy*, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10091306.

- [17] G. E. Aslan, R. Baştuğ, C. Karaca, A. Kurunç, D. Buyuktas, y A. Navarro, "Effects of saline irrigation water applications on evapotranspiration partitioning and crop coefficient of tomato grown in Mediterranean-type greenhouses," *Agronomy*, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14081771.
- [18] R. Madugundu, K. A. Al-Gaadi, E. Tola, V. C. Patil y N. Sigrimis, "The Impact of Salinity and Nutrient Regimes on the Agro-Morphological Traits and Water Use Efficiency of Tomato under Hydroponic Conditions," *Applied Sciences*, vol. 13, pp. 9564, 2023. DOI: 10.3390/app13179564.
- [19] E. Choi, Y. Woo, S. Min, K. Choi y Y. Lee, "Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor," *Journal of Plant Nutrition*, vol. 37, no. 6, pp. 748–764, 2014. DOI: 10.1080/01904167.2013.868479.
- [20] M. Alfosea-Simón, E. A. Zavala-González, J. M. Cámara-Zapata, J. J. Martínez-Nicolás, I. Simón, S. Simón-Grao, y F. García-Sánchez, "Effect of foliar application of amino acids on the salinity tolerance of tomato plants cultivated under hydroponic system," *Scientia Horticulturae*, vol. 272, pp. 109509, 2020. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109509.
- [21] S. T. Patil, U. S. Kadam, M. Mane, D. M. Mahale y J. S. Dhekale, "Hydroponic Growth Media (Substrate): A Review," *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 21, no. 23, pp. 106–113, 2020. DOI: 10.9734/irjpac/2020/v21i2330307.
- [22] D. Savvas, E. Stamati, I. Tsirogiannis, N. Mantzos, P. Barouchas, N. Katsoulas y C. Kittas, "Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems," *Agricultural Water Management*, vol. 91, pp. 102–111, 2007. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2007.05.001.
- [23] N. Nasir y T. Sato, "Effect of nutrient solution concentration on growth, yield, and fruit quality of tomato grown hydroponically in single-truss production system," *Journal of Horticultural Research*, vol. 31, no. 2, pp. 45–53, 2023. doi: 10.2478/johr-2023-0034.
- [24] N. S. Dias, A. A. Diniz, P. L. D. Morais, G. S. Pereira, F. V. S. Sá, B. G. A. Souza, L. F. Cavalcante, y M. F. Neto, "Yield and quality of cherry tomato fruits in hydroponic cultivation," *Bioscience Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 1470–1477, 2019. DOI: 10.14393/BJ-v35n5a2019-42345.
- [25] N. S. Dias, A. A. Diniz, P. L. D. Morais, G. S. Pereira, F. V. S. Sá, B. G. A. Souza, L. F. Cavalcante, y M. F. Neto, "Yield and quality of cherry tomato fruits in hydroponic cultivation," *Bioscience Journal*, vol. 35, no. 5, pp. 1470–1477, 2019. DOI: 10.14393/BJ-v35n5a2019-42345.
- [26] R. Liao, S. Zhang, X. Zhang, M. Wang, H. Wu, y L. Zhangzhong, "Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept," *Agricultural Water Management*, vol. 245, art. no. 106632, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106632.
- [27] Q. Wang, Y. Jia, Z. Pang, J. Zhou, K. E. Scriber II, B. Liang y Z. Chen, "Intelligent fertigation improves tomato yield and quality and water and nutrient use efficiency in solar greenhouse production," *Agricultural Water Management*, vol. 298, 2024, Art. no. 108873. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108873.
- [28] S. Wu, Q. Li, B. Cao, y L. Yu, "Responses of growth, fruit yield, quality, and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation," *Scientia Horticulturae*, vol. 275, art. no. 109710, 2021. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109710.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.