

COMPORTAMIENTO VEGETATIVO-GENERATIVO DE TOMATE Y CHILE DULCE HIDROPÓNICO EN INVERNADERO, SOMETIDOS A AGOTAMIENTO HÍDRICO

Freddy Soto-Bravo^{1/*}, Alejandro Betancourt-Flores²

Palabras clave: *Capsicum annuum* L.; *Solanum lycopersicum* L.; fibra de coco; evapotranspiración del cultivo; riego deficitario; eficiencia de uso de agua.

Keywords: *Capsicum annuum* L.; *Solanum lycopersicum* L.; coir; crop evapotranspiration; deficit irrigation; water use efficiency.

Recibido: 27/06/23

Aceptado: 21/08/23


RESUMEN

Introducción. El uso de agua dulce en agricultura se encuentra limitado debido al deterioro de sus fuentes y su uso indiscriminado. El riego deficitario en agricultura protegida es una alternativa para mejorar la eficiencia en el uso del agua, a través de la reducción de la evapotranspiración del cultivo, sin comprometer su potencial productivo. **Objetivo.** Evaluar el efecto de 3 niveles de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en un sustrato de fibra de coco, sobre el comportamiento vegetativo-generativo de los cultivos de tomate y chile dulce hidropónicos en invernadero. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. En ambos cultivos se aplicaron 3 tratamientos con 11, 22 y 32% de agotamiento hídrico en el sustrato, en un diseño experimental en bloques


completos al azar. Se evaluaron parámetros morfofisiológicos y productivos tales como área foliar (AF), número de hojas (NH), ancho (AH) y longitud de hoja (LH), longitud (LT) y diámetro del tallo (DT), número de nudos (NN), materia seca (MS), conductancia estomática (g_s), evapotranspiración del cultivo (ET_c), eficiencia de uso de agua (EUA), rendimiento de fruto comercial (Rc) de primera (F_1), segunda (F_2) y tercera (F_3), fruto de desecho (F_d) y rendimiento total (Rt). **Resultados.** En los tratamientos en tomate (TT) no hubo efecto sobre el NH, LH, LT y NN; mientras que con TT_{11} se obtuvieron valores superiores en AH, DT y MS. En chile dulce (TC), el TC_{11} obtuvo mayor NH, AH, LH, NN, DT y MS que los demás tratamientos; mientras que no hubo diferencias entre tratamientos en LT. En ambos cultivos, no hubo efecto sobre la ET_c y el Rt, sin embargo, con 11% de agotamiento se obtuvo mayor producción comercial de F_1 y F_2 por lo que consecuentemente hubo mayor EUA

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

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

 0000-0003-1959-9597.

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

 0000-0002-7757-5967.

con 37,32 kg.m⁻³ y 21,46 kg.m⁻³, respectivamente. Para ambos cultivos, la g_s fue diferente entre tratamientos. **Conclusión.** En ambos cultivos, los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico evidenciaron un adecuado balance entre crecimiento vegetativo y productivo, que se reflejó en mayor producción de frutos comerciales de mejor calidad, menos desecho y mayor EUA.

ABSTRACT

Vegetative-generative of hydroponic tomato and sweet pepper produced under greenhouse, subjected to moisture content depletion. Introduction. The amount of usable water is currently limited due to the deterioration of its sources and indiscriminate use. An alternative to this problem is producing under green houses, where it is possible to obtain better water use efficiency (WUE) by reducing crop evapotranspiration (ET_c) without compromising its productive potential. **Objective.** To evaluate the effect of 3 levels of volumetric moisture content depletion in coir on the vegetative-generative behavior of hydroponic tomato and sweet pepper produced under greenhouse cultivation. **Materials and methods.** The study was conducted during August to December 2020 and January 2021, at Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Three treatments were applied: 11, 22 and 32% of water depletion in the substrate. Morphophysiological and reproductive parameters such as: the leaf area (AF), the

number of leaves (NH), width (AH) and length of the leaf (LH), the length (LT) and the diameter of the stem (DT), the number of nodes (NN), dry matter (DM), stomatal conductance (g_s), crop evapotranspiration (ET_c), water use efficiency (WUE), the total yield (Rt), the commercial (Rc) of first (F₁), second (F₂) and third (F₃) and waste fruits (Fd) were evaluated. **Results.** In the tomato treatments (TT) there was no effect on NH, LT, LH and NN; on the other hand, differences were reported in AH, DT and in MS, with treatment TT₁₁ obtaining the higher values. The sweet pepper (TC), the treatment TC₁₁ was statistically superior to the other treatments in number (NH), width (AH) and length (LH) of the leaf, in number of nodes (NN), production of fresh (MF) and dry matter (MS) and in diameter of the stem (DT), while there were no differences between treatments in stem length (LT). There were no differences in ET_c and Rt, for both crops, but there was a difference in the commercial yield once it was divided by quality of fruit, TT₁₁ presented the highest production of first and second fruit quality, while treatment TC₁₁ presented the highest production of first, second and third fruit quality. For both crops, there were significant differences between treatments in terms of stomatal conductance. TT₁₁ and TC₁₁ treatments obtained the highest value of EUA with 37.32 kg.m⁻³ and 21.46 kg.m⁻³, respectively. **Conclusion.** In both crops, treatments with 11 and 22% water depletion showed an adequate balance between vegetative and productive growth, which was reflected in greater production of better quality commercial fruits, less waste and greater WUE.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, el chile dulce (*Capsicum annuum*) es la sexta hortaliza más cultivada, con un área de cultivo aproximada de 500 ha, una producción de 8533 t, un consumo per cápita anual de 3,5 kg (SEPSA 2018) y un rendimiento de 8,2 a 43 t.ha⁻¹ en cultivo a campo abierto

(MAG 2007) y hasta 128 t.ha⁻¹ en invernadero (Soto-Bravo *et al.* 2020). En el 2014 se exportó aproximadamente 1,3 millones de kg a Estados Unidos (Mora *et al.* 2018).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es el cultivo que más se siembra en Costa Rica, con el 90% a campo abierto y un 10% en ambiente protegido. En el 2015, su cultivo generó un ingreso

de \$37 millones, con un consumo per cápita de 17,3 kg (López 2017). En el 2018, el área cultivada se estimó en 1100 ha con una producción total de 57 238 t (INEC 2020).

Para la producción de ambos cultivos, se requiere de emplear una gran cantidad de recurso hídrico. Pero debido al agotamiento y contaminación de este recurso indispensable para la producción, junto al cambio climático y la creciente demanda de alimentos debido al acelerado crecimiento demográfico, se ha generado todo un reto que enfrentará la agricultura en el presente siglo, asegurar su sostenibilidad económica, social y ambiental. Paralelamente, se proyecta un incremento sustancial en la demanda de agua dulce para riego de cultivos en general, la cual representa el 1,5% del total del recurso hídrico disponible en el planeta, y donde el sector agrícola es el principal demandante con un 69% (FAO 2017).

De acuerdo con lo planteado anteriormente, es evidente la necesidad de mejorar la eficiencia de uso del agua (EUA) que representa la relación que existe entre la producción de biomasa (kg) y el consumo de agua (m^3) del cultivo. Para mejorar la EUA, una alternativa es la producción hidropónica en invernadero (Fernández y Camacho 2005, Fernández 2006). En dicho sistema de cultivo es posible mejorar la EUA al regular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a través de la reducción de sus componentes de evaporación y transpiración foliar. En sistemas hidropónicos, habitualmente el sustrato está cubierto de plástico, por lo que la evaporación de agua es despreciable, disminuyendo así la ET_c , ya que se limita únicamente al componente de transpiración.

Para disminuir la transpiración del cultivo se utilizan riegos deficitarios (RD), un método de irrigación en el cual se suministra un volumen de agua inferior al requerimiento (Chai *et al.* 2016) sin causar estrés fisiológico que pueda afectar el rendimiento del cultivo.

Para utilizar la técnica de RD con el fin de incrementar la EUA, es necesario determinar previamente los valores óptimos o umbrales de

agotamiento de humedad (UAH) en el sustrato (Nardella *et al.* 2012, Mattar *et al.* 2020). Los UAH se generan a partir de ensayos con tratamientos de RD decrecientes, con el objetivo de disminuir la ET_c manteniendo o incrementando el rendimiento del cultivo, lo que mejora así la EUA.

El manejo de la irrigación con UAH permite un adecuado balance entre el área foliar (fuente) y los frutos (sumidero), que en términos prácticos se conoce balance vegetativo-generativo en cultivos de fruto. Para esto es importante caracterizar los patrones morfofisiológicos y productivos del cultivo, para ser utilizados como indicadores del balance fuente/sumidero que permite obtener altos rendimientos. Dichos patrones dependen de la genética, del clima y del manejo del riego y la nutrición (Qian *et al.* 2012, Li *et al.* 2017), ya que influyen directamente en la distribución de asimilados y consecuentemente en el balance fuente/sumidero (Iqbal *et al.* 2015).

Diferentes estudios en distintos países han demostrado que el RD contribuye a mejorar la EUA en los cultivos. En Almería, España, en estudios realizados por Fernández y Camacho (2005) en cultivos bajo invernadero, obtuvieron una EUA de $37 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que, en México, Flores *et al.* (2007) reportaron valores de EUA de $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Recientemente, en España, Valcárcel *et al.* (2019) demostraron que al reducir un 50% la ET_c durante el periodo reproductivo del cultivo de tomate, generó un ahorro del recurso hídrico de un 13% sin afectar la productividad, lo cual mejoró la EUA. En Países Bajos, se han obtenido EUA de hasta $66 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en invernaderos con el uso de calefacción e inyección de CO_2 (Pardossi *et al.* 2016).

Sin embargo, el manejo de la irrigación en cultivos hortícolas con RD basado en UAH bajo condiciones del trópico ha sido poco estudiado y la literatura es escasa, principalmente en cultivos hidropónicos bajo invernadero. Al respecto, Pacheco (2018) en un estudio en el cultivo de tomate en fibra de coco bajo invernadero, en Alajuela, Costa Rica, demostró que el control de riego a la demanda del cultivo con un 30% de agotamiento hídrico, mostró el mejor

comportamiento en el balance entre crecimiento vegetativo y generativo reflejado en un mayor rendimiento.

Por otra parte, para irrigar con precisión es determinante conocer las propiedades físico-hídricas del sustrato, y de esta forma determinar los UAH óptimos en sistemas de cultivo hidropónico según el cultivar, el manejo agronómico y las condiciones agroclimáticas. El objetivo final del manejo con RD con valores UAH, es reducir la ET_c y aumentar o mantener los rendimientos para mejorar la EUA. Dicho manejo consecuentemente se manifiesta en un adecuado equilibrio entre el crecimiento vegetativo y generativo reflejado en una balanceada arquitectura del dosel vegetal sin excesivo crecimiento vegetativo o un comportamiento muy generativo (Soto *et al.* 2020). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de 3 niveles de agotamiento del contenido de humedad volumétrica en un sustrato de fibra de coco, sobre el comportamiento vegetativo-generativo de los cultivos de tomate y chile dulce hidropónicos en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó entre agosto 2020 y enero de 2021 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ} 01' N$ y $84^{\circ} 16' W$, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, $22^{\circ}C$ y 78%, respectivamente.

Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente (200 μm) y malla anti-insectos (50 mesh) en las paredes, formado por 4 módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo, altura de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa, orientado en dirección este-oeste. La ventilación fue pasiva en paredes laterales combinada con apertura automatizada de ventanas cenitales según la velocidad del viento e intensidad de lluvia.

Durante el experimento, dentro del invernadero se monitoreó la radiación solar global (Figura 1), (Piranómetro LI-COR Modelo LI-200SA), la temperatura (Figura 2) y la humedad del aire (Figura 3), (VAISALA Modelo HMP-35C); todos estos datos fueron almacenados en un "data logger" (Campbell Scientific. Mod. CR1000).

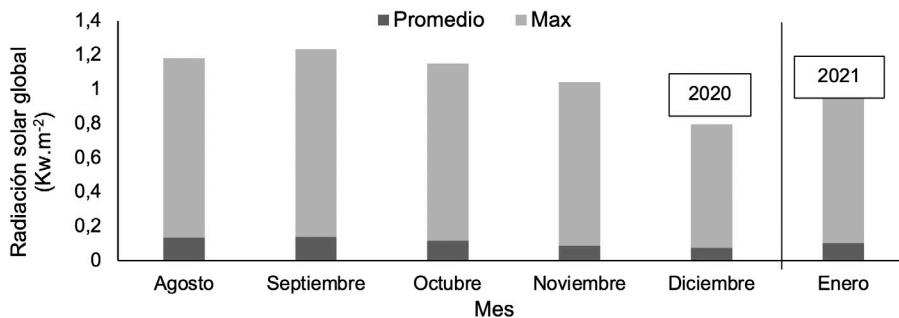


Figura 1. Valores promedio mensual de radiación solar global ($Kw.m^{-2}$) media y máxima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

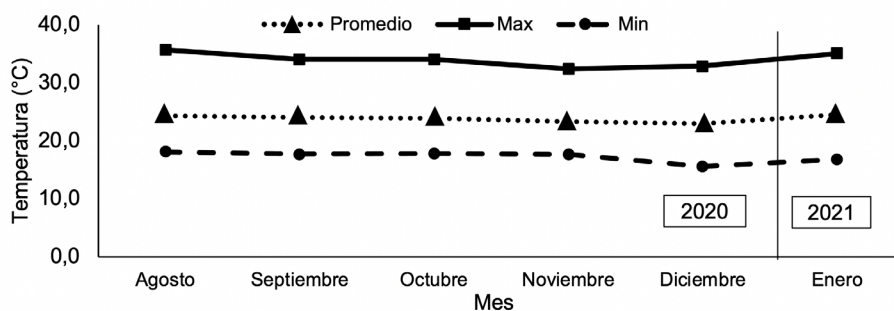


Figura 2. Valores promedio mensual de temperatura (°C) media, máxima y mínima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

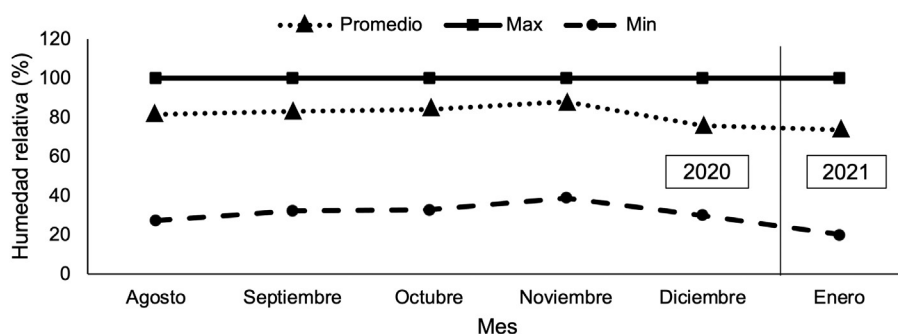


Figura 3. Valores promedio mensual de humedad relativa (%) media, máxima y mínima en el interior del invernadero durante el desarrollo de la investigación.

Se utilizó un sistema de cultivo hidropónico abierto sin recuperación de drenaje, con un sustrato de fibra de coco en tablas comprimidas (100 cm x 14 cm x 13 cm) con cobertura plástica

color blanco y un volumen aproximado 18,2 L. Las características físicas del sustrato (Tabla 1) se determinaron con la norma europea UNE-EN-13041 (AENOR 2007).

Tabla 1. Características físicas de la fibra de coco utilizada en el experimento como medio de cultivo.

Características físicas	Fibra de coco	% Óptimo*
Partículas > 4 mm (%)	54,25	--
Partículas entre 1 y 4 mm (%)	39,00	--
Partículas < 1 mm (%)	6,75	--
Densidad aparente (g.cm ⁻³)	0,096	--
Densidad real (g.cm ⁻³)	1,468	--
Porosidad total (%)	93,47	> 85%
Partículas sólidas (%)	6,53	< 15%

* Según Ansorena, 1994.

En el cultivo de chile dulce se utilizó el híbrido “Dulcítico” de crecimiento indeterminado, inicio de cosecha entre 75 y 90 días después de siembra, frutos de forma cónica color verde-rojizo, alto grado brix y un rendimiento de hasta 12,8 kg.m² (Soto-Bravo *et al.* 2020). En tomate se utilizó el híbrido “Gladiator”, el cual presenta crecimiento indeterminado vigoroso, inicio de cosecha de 70 a 100 DDT, con frutos de larga vida postcosecha, multilocular, de buen cierre pistilar y con peso medio de 180-240 g y resistencia a *Verticilium* y *Fusarium* razas 1 y 2.

En ambos cultivos, la siembra se realizó por trasplante el 20 de agosto de 2020, con plántulas de 35 días después de la siembra de edad en chile dulce y 28 días en tomate, con 5 a 6 hojas verdaderas, producidas en turba (peat moss) en bandejas plásticas de 98 celdas. Se sembraron 3 plantas por tabla de fibra de coco con distancias de 33,3 cm entre plantas y de 1,5 m entre hileras para una densidad de 2 plantas por metro cuadrado.

En prácticas culturales de chile dulce se realizaron deshierbas por debajo de la primera bifurcación de la planta. El amarre en chile dulce se realizó con cuerdas de nylon que sujetaban 2 tallos principales desde la primera bifurcación que lo guiaban hasta un cable acerado ubicado a una

altura de 2,5 m. Todas las ramas emergentes se sujetaron con hilos de nylon a anillos colocados en las 2 cuerdas principales. En el cultivo de tomate se realizaron deshierbas de los brotes laterales con el fin de formar la planta a un solo tallo, el cual fue conducido con cuerdas de nylon hasta los cables acerados del sistema de tutorado. Para el manejo de plagas y enfermedades en ambos cultivos se realizaron podas sanitarias de hojas senescentes, tallos y frutos dañados, y se realizó un monitoreo exploratorio semanal para determinar la presencia de plagas y la necesidad de aplicaciones fitosanitarias de productos biológicos, preventivos o erradicantes.

Para ambos cultivos, se aplicaron 3 tratamientos de agotamiento hídrico con una gradiente de disminución constante de la humedad volumétrica (θ) en la fibra de coco. Para ello se determinó la curva de retención de humedad volumétrica (θ) del sustrato (Figura 4) según la norma UNE-EN-13041 (AENOR 2007). Una vez definido el nivel de agotamiento hídrico, se estimó el volumen de riego para cada tratamiento con base en el porcentaje de agotamiento establecido, el volumen de sustrato (18,2 L) y un porcentaje de drenaje (15%) previamente establecido (Soto *et al.* 2020).

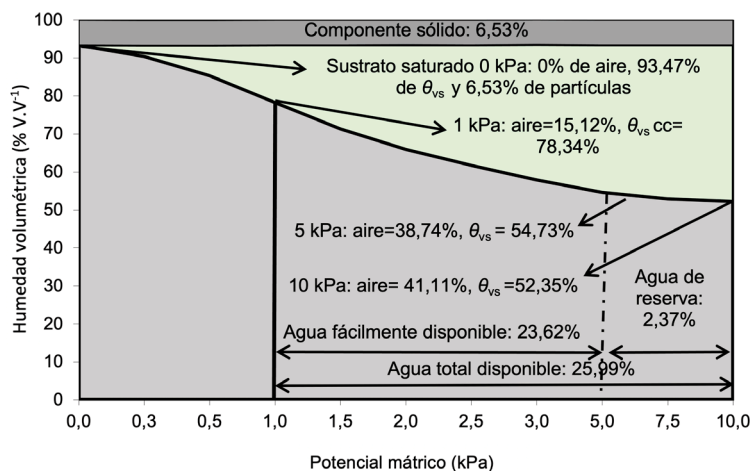


Figura 4. Contenido de partículas sólidas y curva de desorción de agua y capacidad de aireación a diferente potencial mátrico; y contenidos de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en el sustrato de fibra de coco. Laboratorio de hortalizas, Estación Experimental Agrícola, Fabio Baudrit Moreno. Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 2020.

En la Tabla 2 se resumen las características de los tratamientos de agotamiento hídrico

utilizados en los cultivos de tomate (TT) y chile dulce (TC).

Tabla 2. Tratamientos de agotamiento utilizados en los cultivos de tomate (TT) y chile dulce (TC) en fibra de coco, expresados en porcentaje de agotamiento, potencial mátrico, porcentaje de humedad volumétrica y litros de agua agotados del ATD en cada tabla de 18,2 L de sustrato.

Tratamiento	Porcentaje de agotamiento	Potencial mátrico (kPa)	Humedad volumétrica (%)	Litros de agotamiento
TT ₁₁ y TC ₁₁	11	1,70	69,90	1,54
TT ₂₂ y TC ₂₂	22	2,50	61,45	3,07
TT ₃₂ y TC ₃₂	32	7,50	53,01	4,61

El agua se suministró mediante un sistema de riego a la demanda del cultivo, que monitoreaba, en tiempo real, los volúmenes de agua aplicada (caudalímetro ARAD, Mod. SF 15) y de drenaje (pluviómetro Mod. ECRN-100, ECHO Rain) y el contenido de humedad volumétrica del sustrato con un sensor capacitivo (Decagon Devices) tipo TDR (Time domain reflectometry). Los datos recolectados se almacenaron en un “datalogger” (Decagon Devices ProCheck).

El área experimental de cada cultivo estaba compuesta por 12 hileras separadas a 1,5 m, con 17 sacos de fibra de coco/hilera. En cada saco se colocaron 3 plantas espaciadas a 0,33 m para una densidad de 2 plantas por m² y un total de 612 plantas por cultivo. En ambos cultivos, se

utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar, donde cada tratamiento de agotamiento hídrico tenía 3 repeticiones para un total de 9 unidades experimentales/cultivo. Cada unidad experimental estaba formada por 15 sacos de fibra de coco distribuidas en 3 hileras de 5 sacos cada una. En cada saco se sembraron 3 plantas, para un total de 45 plantas por unidad experimental.

La solución nutritiva utilizada correspondió a las concentraciones de nutrientes validadas para los cultivos de tomate y chile dulce por Duarte (2019) y Monge (2020), respectivamente (Tabla 3). La conductividad eléctrica estimada que incluyó los aportes del agua de riego (CE: 0,14 dS.m⁻¹) fue de 1,72 dS.m⁻¹.

Tabla 3. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva utilizada para la producción de chile dulce y tomate en fibra de coco bajo invernadero.

Nutriente (mg.L ⁻¹)											CE	
Ca	K	Mg	N	S	P	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo	(dS.m ⁻¹)
160	203	45	140	65	35,4	1	0,3	0,8	0,3	0,5	0,1	1,58

Variables respuesta

Variables morfológicas: se evaluó quincenalmente el ancho (AH) y longitud de hoja (LH) y el diámetro basal del tallo (DT); y mensualmente el número de hojas (NH), la longitud de tallo (LT) y el número de nudos (NN). El área foliar (AF), la producción de materia seca (MS) se evaluaron 3 veces a lo largo del ciclo. Dichas variables se evaluaron en 3 plantas por unidad experimental para un total de 9 plantas por tratamiento.

- A. El AH se midió con cinta métrica en la parte media de la hoja.
- B. La LH se calculó desde la base hasta la punta del foliolo.
- C. El DT se midió con un caliper digital en la base del tallo a 2 cm por encima del nivel del sustrato.
- D. El NH por planta se cuantificó mediante un conteo manual por planta.
- E. La LT se midió con una cinta métrica, desde la base del tallo hasta el ápice del eje más largo.
- F. El número de nudos (NN) se determinó mediante conteo manual por planta de todos los nudos formados al momento de la evaluación.
- G. El AF se cuantificó al remover manualmente las hojas de cada planta y utilizar un medidor de área (LI-COR MODEL 3100).
- H. La producción de MS se evaluó en 3 muestreos de 3 etapas fenológicas: 1-fase vegetativa, 2- inicio de floración y cuaje de frutos y 3- al final de ciclo de producción. En cada evaluación se recolectaron 2 plantas por repetición para un total de 6 por tratamiento, se cuantificó la masa fresca, se colocaron en bolsas de papel y se secaron en estufa a 70°C hasta obtener peso constante.

Variables fisiológicas: se evaluó la conductancia estomática (g_s), la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la eficiencia de uso de agua (EUA). La g_s ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) se midió con un porómetro (Decagon, Mod. SC-1) cada 15 días en 3 plantas por repetición y un total de 9 plantas por tratamiento. La ET_c (L.m^{-2}) se determinó semanalmente mediante el método de balance de agua, a partir de los volúmenes (L.m^{-2}) de riego (R) y de drenaje (D) y la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato ($\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$) al inicio (θ_i) y final (θ_f) de cada semana, según ecuación descrita por Soto (2018).

$$ET_c = R - D - (\theta_i - \theta_f) \quad \text{Ecuación 1}$$

Finalmente, la eficiencia de uso de agua (EUA) se determinó como el cociente entre rendimiento de fruto fresco (kg.m^{-2}) y la ET_c ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}$), tanto para el rendimiento comercial como para el rendimiento total (Salazar *et al.* 2014).

$$EUA = \frac{\text{rendimiento (kg.m}^{-2}\text{)}}{\text{volumen (m}^3.\text{m}^{-2}\text{)}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Variables productivas: durante 14 semanas del periodo de cosecha de ambos cultivos, se evaluó semanalmente el rendimiento de frutos en 12 plantas por repetición y 36 por tratamiento. Se evaluó el Rc con la clasificación de los frutos en 3 categorías de calidad según su peso, en primera (F_1), segunda (F_2) y tercera (F_3). En chile dulce se clasificaron los frutos en 3 calidades: F_1 con pesos entre 107 y 185 g sin deformaciones ni manchas, F_2 con pesos entre 81 y 132 g y F_3 con masas de 46-80 g con deformaciones y manchas leves según Monge (2020). En tomate se clasificaron los frutos en F_1 , F_2 y F_3 con diámetros aproximados a 8 cm, 6 cm y 4 cm, respectivamente.

Finalmente, para ambos cultivos se contabilizaron los frutos de desecho (F_d) con daños físicos y mecánicos, para estimar el rendimiento total de frutos (Rt) como la suma de Rc más desecho.

Análisis estadístico. El análisis de los datos se realizó mediante el programa estadístico R y con uso de las librerías: agricolae,

tidyverse, readxl, stringr, DT, car, carData y ggplot2 (Möhring *et al.* 2021). En primera instancia, se procedió a realizar un análisis de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y homocedasticidad (Bartlett) para las variables teóricamente normales. Cuando se cumplían los supuestos anteriores, se realizó un análisis de varianza y si se detectaron efectos significativos, se realizó una comparación múltiple de medias ($p < 0,05$) según Di Rienzo *et al.* (2002) para contrastar las variaciones entre los tratamientos. Seguidamente se realizaron contrastes todos contra todos al ser solo 3 tratamientos. Cabe resaltar que los mismos no son ortogonales por lo tanto se utilizó la corrección de Bonferroni como α/k , donde k fue el número de comparaciones a realizar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento morfológico. En tomate, los tratamientos de agotamiento hídrico afectaron ($p < 0,05$) el AH, el DT, el AF y la producción de MS, mientras que no hubo efectos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) sobre LH, NH, LT y NN (Tabla 4).

El promedio de AH en el cultivo de tomate mostró una tendencia a incrementar conforme se redujo el estrés hídrico, donde el TT_{11} fue similar a TT_{22} y superior a TT_{32} , sin diferencias entre TT_{22} y TT_{32} (Tabla 4). El patrón en el comportamiento del AH, aun cuando no hubo diferencias entre tratamientos en la LH, fue consecuente con un incremento en el AF conforme descendió el estrés hídrico. El TT_{11} obtuvo un 12,5% y un 26% más de área foliar con respecto a con TT_{22} y TT_{32} (Tabla 4).

Tabla 4. Valores promedio de ancho de hoja, área foliar, materia seca, diámetro del tallo, número de hojas, longitud de la hoja, número de nudos y longitud del tallo en plantas de tomate sometidas a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT_{11}), 22% (TT_{22}) y 32% (TT_{32}) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Variable respuesta	Tomate		
	TT_{11}	TT_{22}	TT_{32}
Ancho de hoja (cm)	44,28 a	42,11 ab	40,25 bc
Área foliar (cm ²)	11212 a	9800 b	8219 c
Materia seca (g)	222 a	185 b	157 bc
Diámetro de tallo (mm)	41,95 a	38,79 bc	37,46 c
Número de hojas	79 a	79 a	79 a
Longitud de hoja (cm)	49,66 a	46,05 a	44,71 a
Número de nudos	78 a	78 a	78 a
Longitud de tallo (LT)	576,6 a	577,2 a	575,6 a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Consecuentemente, a menor agotamiento hídrico y mayor AF en T_{11} , la producción de MS fue superior, probablemente debido a una mayor capacidad fotosintética soportado por una mayor fuente de AF. En MS, el TT_{11} produjo un 16% más de MS respecto a TT_{22} y 30% más con respecto a TT_{32} ; donde estos 2 últimos no mostraron

diferencias entre sí (Tabla 4). Finalmente, el DT de plantas de tomate, fue menor conforme incrementó el agotamiento hídrico, donde el TT_{11} fue en promedio un 7,5% y un 10,7% superior a TT_{22} y TT_{32} , respectivamente, sin diferencias entre estos últimos (Tabla 4).

En el cultivo de chile dulce, todas las variables morfológicas fueron estadísticamente diferentes entre tratamientos. Las variables relacionadas con el tamaño de la fuente de la planta, tales como el AH, LH y NH, fueron estadísticamente superiores conforme disminuyó el estrés hídrico. Consecuentemente, el AF y la

producción de MS fue superior en el TC₁₁ respecto a TC₂₂ y TC₃₂. De forma similar al cultivo del tomate; el AH fue la variable que mantuvo un patrón consecuente con el comportamiento del AF, con una tendencia al incremento estadísticamente significativa, conforme se redujo el nivel de estrés hídrico (Tabla 5).

Tabla 5. Valores promedio de ancho de hoja, área foliar, materia seca producida, diámetro del tallo, número de hojas, longitud de la hoja, número de nudos y longitud del tallo en plantas de chile dulce sometidas a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TC₁₁), 22% (TC₂₂) y 32% (TC₃₂) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Variable respuesta	Chile dulce		
	TC ₁₁	TC ₂₂	TC ₃₂
Ancho de hoja (cm)	11,44 a	10,39 b	9,64 c
Longitud de hoja (cm)	21,39 a	20,84 b	20,13 b
Número de hojas	1017 a	844 b	765 bc
Área foliar (cm ²)	11212 a	9800 b	8219 c
Materia seca (g)	222 a	185 b	157 bc
Número de nudos	907 a	794 b	725 bc
Longitud de tallo (cm)	310,3 a	286,1 b	276,2 b
Diámetro de tallo (mm)	34,80 a	32,29 b	29,58 b

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Similar al cultivo de tomate, el DT de plantas de chile dulce fue menor conforme disminuyó el agotamiento hídrico (Figura 3C), donde TC₁₁ fue superior un 7% que TC₂₂ y 15% más que TC₃₂, estos 2 últimos fueron iguales entre ellos (Tabla 5).

En ambos cultivos, las plantas con el menor agotamiento hídrico (TT₁₁ y TC₁₁) produjeron mayor biomasa aérea (MS) que los tratamientos con mayor agotamiento hídrico. Esto estuvo relacionado principalmente con el AH que repercutió positivamente en mayor tamaño de fuente reflejado en una superior AF. En respuesta a un mayor nivel de agotamiento hídrico, los tratamientos con 22 y 32% redujeron el AH, LH y el NH, variables que determinan el tamaño del AF foliar, la cual está directamente relacionada con la transpiración del cultivo y con la producción de biomasa (MS).

El anterior comportamiento ha sido evidenciado por estudios realizados en chile dulce por González *et al.* (2007) y Quesada (2015). El primero demostró que el déficit hídrico durante la etapa productiva redujo el AF y consecuentemente la producción de biomasa, mientras que Quesada (2015) en el cultivo bajo invernadero observó una tendencia a disminuir el AF conforme se aumentaba el agotamiento, lo que consecuentemente redujo la producción de MS.

En tomate, se ha demostrado que el estrés hídrico inhibe el crecimiento y limita la expansión foliar (García *et al.* 2004), debido a que el proceso de expansión celular es mucho más sensible a dicho estrés que el proceso de división celular (Florido y Bao 2014). Además, el déficit de agua reduce el crecimiento de la raíz y consecuentemente el crecimiento de la parte aérea (Potters *et al.* 2007), lo que afectó dicha relación.

Los resultados obtenidos en este estudio demostraron que el estrés hídrico en ambos cultivos inhibió el crecimiento vegetativo limitado por la expansión foliar (AH, LH, AF), lo que afecta consecuentemente el balance vegetativo-generativo del cultivo. Estas modificaciones en la arquitectura del dosel vegetal responden principalmente al manejo del riego y a su efecto sobre la relación entre los componentes vegetativo aéreo y el sistema radical (Potters *et al.* 2007). Esto debido a que las plantas requieren un sistema radicular suficientemente desarrollado para abastecer la demanda hídrica de los órganos aéreos (Peleg *et al.* 2011). Las raíces crecen adecuadamente cuando la humedad es óptima y uniforme en todo el volumen del sustrato, lo que favorece un buen volumen radicular.

Un manejo del riego con alto nivel de agotamiento hídrico implica riegos poco frecuentes que afectan una distribución uniforme de la humedad en el perfil del sustrato, lo que consecuentemente limita el crecimiento radical y afecta la relación entre el dosel vegetal y sistema radicular de la planta (Potters *et al.* 2007), como respuesta adaptativa a una menor capacidad radicular para abastecer la demanda transpiratoria. Al respecto, Bar-Tal *et al.* (1995) demostraron que en chile hidropónico bajo invernadero al reducir el volumen del contenedor se limitó el crecimiento radical y consecuentemente el AF.

En el presente estudio, las plantas de ambos cultivos modificaron el AF al variar la forma de la hoja, en términos de AH en tomate y el AH, LH y NH en chile dulce, en respuesta al nivel de estrés hídrico, como una forma de evitar la pérdida excesiva de agua, ya que el AF está estrechamente relacionada con la tasa de transpiración del cultivo (Taiz y Zeiger 2003, Qiu *et al.* 2013, Di Benedetto y Tognetti 2016).

El DT es una variable que está directamente relacionada con el manejo del riego de los cultivos, ya que su contracción y expansión es una respuesta morfofisiológica al estado hídrico de las plantas (Kumar *et al.* 2017). En

el presente estudio, el DT de las plantas de chile dulce y tomate con mayor agotamiento hídrico de 22 y 32%, fueron en promedio un 10% más delgados que el tratamiento de 11%. Al respecto, Kumar *et al.* (2017) demostraron que el DT en plantas de tomate disminuyó conforme se redujo el aporte hídrico, mientras que Taiz y Zeiger (2003) demostraron que la variación en el diámetro basal del tallo es un indicador de estrés hídrico en el cultivo de tomate.

Ante situaciones de estrés hídrico la planta modifica el DT, que está relacionado con el estado hídrico del cultivo. Además, modifica el NH, el AH y la LH que determinan su AF, la cual está directamente relacionada con la transpiración del cultivo (García *et al.* 2004, Dobermann 2007). Al respecto, Pacheco (2018) no obtuvo efecto ante 3 niveles de agotamiento hídrico (10, 20 y 30%) sobre el NH y LT en plantas de tomate hidropónico en invernadero, probablemente debido a que el nivel de estrés hídrico no fue suficiente para afectar los procesos fisiológicos de la planta.

En el cultivo de chile dulce en invernadero, estudios realizados por Gallardo *et al.* (2004), González *et al.* (2007) y Jara (2018), encontraron que el DT se redujo conforme aumenta el nivel de estrés hídrico, lo cual evidenció así que dicho parámetro es un indicador del estrés hídrico.

Conductancia estomática (g_s). Las plantas regulan la g_s mediante señales que involucran algunas fitohormonas, principalmente ABA, como mecanismo para mitigar el estrés hídrico y evitar la deshidratación.

En la presente investigación, en ambos cultivos, los tratamientos con 11% de agotamiento hídrico, obtuvieron los mayores valores de g_s , con una tendencia decreciente conforme aumentó el porcentaje de agotamiento hídrico (Figura 5). Asociado a la reducción del AF, el déficit hídrico promovió una reducción del potencial hídrico de las hojas, lo cual actúa como una señal hidráulica-hormonal que induce al cierre parcial de estomas (Khapte *et al.* 2019),

manifestándose en una reducción de la g_s , tal como como se evidenció en el presente estudio.

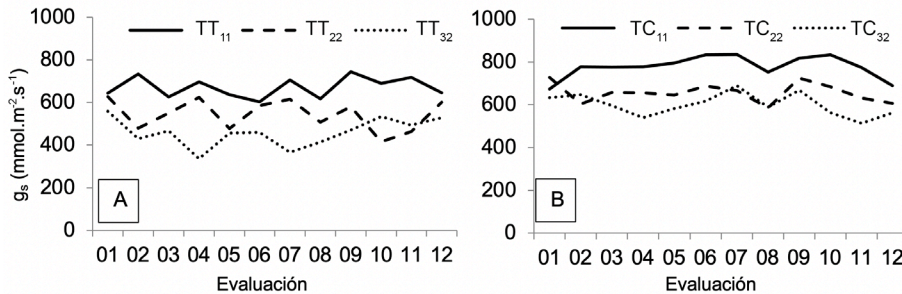


Figura 5. Valores promedio de conductancia estomática ($\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) en hoja, en tratamientos de 3 porcentajes de agotamiento hídrico de 11, 22 y 32% del contenido de humedad volumétrica del sustrato, en plantas de (A) tomate (TT_{11} , TT_{22} , TT_{32}) y (B) de chile dulce (TC_{11} , TC_{22} , TC_{32}).

En el cultivo de tomate, a lo largo del periodo, la g_s fluctuó entre los 400 y 800 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figura 4A), con diferencias significativas entre todos los tratamientos. El tratamiento TT_{11} obtuvo los mayores valores de g_s , con una tendencia creciente conforme disminuyó el porcentaje de agotamiento hídrico, con valores promedios durante el ciclo de cultivo de 677,54 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, 543,74 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y 463,67 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, para los tratamientos TT_{11} , TT_{22} y TT_{32} , respectivamente.

En el caso del cultivo de chile dulce la g_s fluctuó entre 400 a 900 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figura 4B), con diferencias significativas entre todos los tratamientos. El TC_{11} presentó los mayores valores de g_s durante el ciclo de cultivo con 778,24 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, seguido de TC_{22} con 681,59 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ y finalmente TC_{32} con 611,35 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. En ambos casos las plantas sometidas al estrés hídrico regularon la apertura estomática principalmente debido a la acumulación de ABA, esta acumulación de fitohormonas ha sido ampliamente estudiada y está estrechamente ligada a una reducción en la g_s , la cual se puede utilizar como una medida indirecta, ya que es el mecanismo principal para mitigar la pérdida

de agua por evapotranspiración. En el cultivo de tomate valores de g_s de 800 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ son un indicativo de que no se está dando una adecuada circulación del agua y fotosíntesis (Davies *et al.* 2000, Campos *et al.* 2009, Giuliani *et al.* 2018).

La regulación en la pérdida de agua mediante el cierre parcial de estomas genera reducciones desde 33 hasta 44% en la g_s en cultivos de tomate bajo déficit hídrico (Savic *et al.* 2009). En este estudio, en tomate se determinó una disminución en la g_s de hasta un 31% en el tratamiento TT_{32} respecto a TT_{11} . En otro estudio realizado por Nemeskéri *et al.* (2019), al aplicar riego deficitario obtuvieron valores de g_s (893,4 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) inferiores a un cultivo de tomate bien irrigado (950 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

En el cultivo de chile dulce, Ismail *et al.* (2002) encontraron una reducción de hasta 160 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en las plantas con mayor nivel de estrés hídrico. Lo cual es coincidente con los resultados obtenidos en la presente investigación, ya que la g_s se redujo de TC_{32} a TC_{11} en 146 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en los picos más altos y de 128 $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en los más bajos, debido probablemente a elevadas concentraciones de ABA. En otro estudio, Aladenola y Madramootoo (2014),

obtuvieron valores de g_s similares a los obtenidos por Ismail *et al.* (2002), con reducciones desde 15% hasta 25% en los tratamientos más agotados.

Evapotranspiración de los cultivos (ET_c) de tomate y chile dulce. En ambos cultivos, la

ET_c promedio total ($L.m^{-2}$) no fue estadísticamente diferente ($p < 0,05$) entre tratamientos (Figura 6). No obstante, se evidenció una tendencia a incrementar la ET_c conforme acrecentaba el agotamiento hídrico.

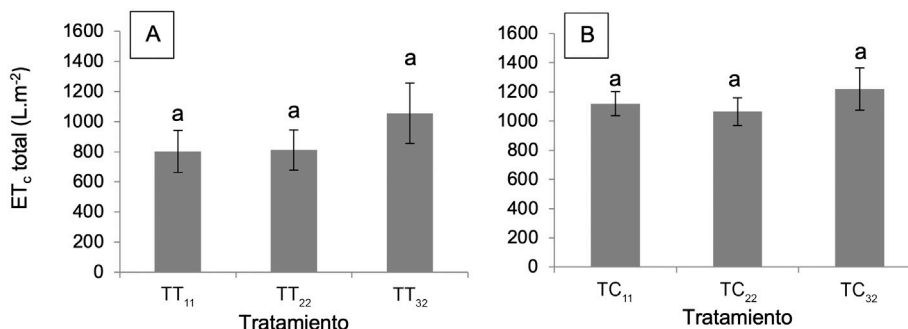


Figura 6. Valores promedio de evapotranspiración del cultivo (ET_c) de (A) tomate (TT) y (B) chile dulce (TC) sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT₁₁, TC₁₁), 22% (TT₂₂, TC₂₂) y 32% (TT₃₂, TC₃₂) del contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Esto probablemente fue debido a que, según el tratamiento hídrico, varió el manejo del riego. Al final del día el volumen total de riego aportado ($L.m^{-2}$) fue similar entre tratamientos, aunque con volúmenes y frecuencias de riego diferentes, ya que conforme incrementó el nivel de agotamiento, aumentó el volumen (cuánto) y la frecuencia de riegos (cuándo). Al respecto, Rodríguez *et al.* (2014) demostraron que el manejo del riego influye directamente en el comportamiento morfológico y productivo del cultivo.

Comportamiento productivo

En ambos cultivos, no hubo efecto ($p > 0,05$) de los tratamientos sobre el rendimiento de frutos total y de desecho. Sin embargo, hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) sobre el rendimiento comercial, debido

a las diferencias en la partición de frutos según calidad (Tabla 6).

En el cultivo de tomate se encontraron diferencias en cuanto a la producción de frutos de I y II calidad, no así en las calidades III y desecho. El tratamiento TT₁₁ obtuvo el mayor rendimiento en calidad I, con 320 g más por planta que los tratamientos TT₂₂ y TT₃₂, estos últimos fueron iguales entre sí (Tabla 6). Dicha diferencia equivale a 6,4 t.ha⁻¹ más de producción de frutos de I calidad.

En producción de II calidad, el TT₁₁ obtuvo 930 g más por planta con respecto a TT₃₂ (Tabla 6), no así con respecto a TT₂₂, pues estos fueron iguales. En t.ha⁻¹ dicha diferencia fue equivalente a 18,6 t.ha⁻¹ más de frutos de II calidad. Los tratamientos TT₂₂ y TT₃₂ fueron estadísticamente iguales. En rendimiento comercial

(I, II y III), el TT_{11} obtuvo 1270 g más que TT_{32} , equivalente a una diferencia de 25,4 t.ha⁻¹.

En el cultivo de chile, el rendimiento total de frutos no fue estadísticamente diferente entre tratamientos. En rendimiento de frutos de I, II y III calidad, el TC_{11} fue estadísticamente superior

a TC_{32} y similar a TC_{22} . Los tratamientos TC_{22} y TC_{32} fueron estadísticamente iguales en todas las calidades de fruta. El TC_{11} obtuvo un rendimiento de frutos de 330 g de I, 400 g de II y 110 g de III por planta, superior a TC_{32} (Tabla 5), equivalente a un aumento de 16,8 t.ha⁻¹.

Tabla 6. Rendimiento total, comercial y por calidad de frutos por planta, en los cultivos de tomate (TT) y (B) chile dulce (TC) sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (TT_{11} , TC_{11}), 22% (TT_{22} , TC_{22}) y 32% (TT_{32} , TC_{32}) del contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Componente rendimiento	Tomate			Chile dulce		
	TT_{11}	TT_{22}	TT_{32}	TC_{11}	TC_{22}	TC_{32}
Primera (I) (kg.pl ⁻¹)	1,24 a	0,92 b	0,92 b	1,63 a	1,51 ab	1,30 bc
Segunda (II) (kg.pl ⁻¹)	4,83 a	4,70 ab	3,90 bc	1,71 a	1,53 ab	1,31 bc
Tercera (III) (kg.pl ⁻¹)	1,81 a	1,80 a	1,79 a	1,60 a	1,54 ab	1,49 bc
Desecho (kg.pl ⁻¹)	0,40 a	0,59 a	0,89 a	0,70 a	0,88 a	0,99 a
Comercial (kg.pl ⁻¹)	7,88 a	7,42 ab	6,61 bc	4,94 a	4,58 ab	4,10 c
Total (kg.pl ⁻¹)	8,28 a	8,01 a	7,50 a	5,64 a	5,46 a	5,09 a

Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Eficiencia de uso de agua (EUA)

En la presente investigación, tanto en tomate como en chile dulce, los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico obtuvieron una EUA similar, y superior a los tratamientos con un agotamiento de 32%. En el cultivo de tomate, el TT_{11} obtuvo un rendimiento 47,4% superior a TT_{32} ; mientras que, en chile dulce, el TC_{11} obtuvo un rendimiento 57,5% superior a TC_{32} (Figura 7).

Considerando que la EUA (kg.m⁻³) es la relación entre el rendimiento de frutos (kg.m⁻²) y la ET_c del cultivo (m³.m⁻²), esta mayor EUA fue producto de un mayor rendimiento comercial en las plantas con 11 y 22% de agotamiento respecto a 32%, ya que la ET_c no difirió entre tratamientos. A mayor agotamiento hídrico, la planta tiene que ejercer mayor succión (kPa) para extraer el agua del sustrato, lo que implica un mayor gasto energético a expensas del rendimiento.

Consecuentemente, se generan cambios morfológicos para adaptarse a la condición de agotamiento hídrico, que según su intensidad puede manifestarse en aumentos o disminuciones de la productividad (Rodríguez *et al.* 2014, Soto 2018).

Lo anterior se debe a que, en ambos cultivos, un mayor nivel de agotamiento hídrico tuvo como consecuencia un desbalance entre los componentes vegetativos y reproductivos (fuente/sumidero), lo que afectó el suministro de foto-asimilados para el buen llenado de frutos. Las plantas como respuesta a la condición de estrés adoptaron un comportamiento más reproductivo con el fin de preservar la especie (Soto 2018). Además, como respuesta al estrés hídrico, la planta aborta órganos reproductivos tales como flores y frutos recién cuajados, sosteniendo solo los que puede llenar (Ferrara *et al.* 2011, Tanaskovik *et al.* 2017). Por el contrario, los tratamientos con menor agotamiento hídrico

de 11 y 22%, evidenciaron un mejor balance entre crecimiento vegetativo y generativo, que

se tradujo en un mayor rendimiento comercial de frutos de primera y segunda calidad.

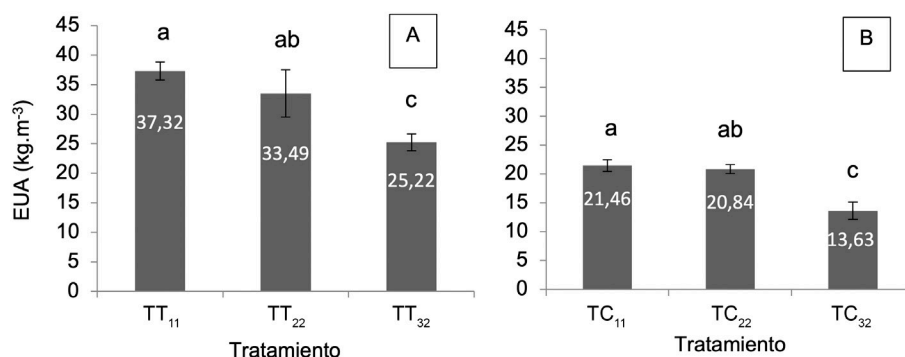


Figura 7. Eficiencia en el uso de agua con base en rendimiento comercial de los cultivos de tomate (A) y de chile dulce (B), sometidos a 3 tratamientos de agotamiento hídrico de 11% (T_{11}), 22% (T_{22}) y 32% (T_{32}) del contenido de humedad volumétrica del sustrato.

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

El contenido óptimo de humedad en el sustrato conocido como umbral de riego (UR), depende principalmente del clima, del cultivo y del tipo de sustrato, entre otros factores. La aplicación de estrategias de riego deficitario puede tener diferentes efectos sobre el cultivo. Por tanto, una apropiada estrategia de riego se refiere a la utilización de un valor de UR que permita incrementar la EUA (Kirda *et al.* 2004), así como reducir la ET_c y/o incrementar el rendimiento del cultivo (Ćosić *et al.* 2015). En la presente investigación, los tratamientos TT_{11} y TC_{11} permitieron mejorar la EUA en rendimiento comercial, ya que se obtuvo un incremento del rendimiento en frutos de I y II calidad, aun cuando la ET_c fue similar entre tratamientos. Coincidentemente, en un estudio realizado en Jordania en tomate, con el uso de riegos deficitarios se obtuvo un aumento de la EUA al reducir la ET_c , a pesar de una reducción en el rendimiento comercial (Mahadeen *et al.* 2011). De forma similar en España, la

EUA incrementó, ya que se obtuvo un apreciable ahorro de 28% en agua con una reducción de 16,4% en el rendimiento comercial (Lahoz *et al.* 2016). En otros estudios, Khapte *et al.* (2019) reportaron que, a pesar de las reducciones en rendimiento debido a un descenso en el número y tamaño de frutos, el déficit hídrico mejoró la calidad de frutos en firmeza, contenidos de licopeno, sólidos solubles, ácido ascórbico y la acidez, como consecuencia de una redistribución de los foto-asimilados en menos sumideros.

Los efectos de una estrategia de riego deficitario también varían según la etapa fenológica del cultivo. En estudios realizados con RD en el cultivo de tomate durante la etapa de floración, se reportaron valores de EUA de 19,2 kg.m^{-3} (Nangare *et al.* 2016) y de 17,45 kg.m^{-3} (Patanè *et al.* 2011) producto de un incremento en el rendimiento sin reducciones en el consumo de agua. Dichas EUA fueron apreciablemente inferiores a los valores obtenidos con 11 y 22%

de agotamiento hídrico en el cultivo de tomate ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) del presente estudio.

En Jordania se desarrolló un ensayo con agotamientos similares a los de esta investigación, en donde se utilizaron diferentes niveles de RD clásico durante todo el periodo productivo del cultivo de tomate. Los autores reportaron una reducción en el rendimiento, sin embargo, aumentó la EUA con $17\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ y $23,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en 2 diferentes cultivares (Mahadeen *et al.* 2011). Dichos valores de eficiencia fueron similares a los obtenidos en esta investigación, donde se obtuvo una máxima EUA de $37,32\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el tratamiento TT_{11} , luego una de $33,49\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el TT_{22} y finalmente una de $25,22\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en el TT_{32} .

En el cultivo de chile dulce, de forma similar al tomate, el rendimiento disminuyó conforme aumentó el nivel de agotamiento producto de modificaciones morfofisiológicas y reproductivas, que afectaron la EUA. Al respecto, Karam *et al.* (2009) reportó que reducciones del requerimiento hídrico de 80, 60 y 40% redujo el rendimiento en 11,3; 12,2 y 38,2%, respectivamente. Finalmente, Aladenola y Madramootoo (2014), en un estudio con tratamientos de RD clásicos durante la etapa productiva, demostraron que conforme aumentaba el nivel de agotamiento disminuía el rendimiento comercial. Así los valores de EUA fluctuaron desde $2,9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ hasta $31,6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

CONCLUSIONES

En chile y tomate el nivel de agotamiento hídrico no afectó el rendimiento total de frutos.

Los tratamientos con 11 y 22% de agotamiento hídrico incrementaron el rendimiento comercial debido a una mayor producción de frutos de primera y segunda calidad y menos desecho, lo cual se reflejó en una mayor eficiencia de uso de agua.

El incremento del rendimiento comercial está relacionado con un mejor balance entre crecimiento vegetativo y reproductivo debido a una mejor distribución de asimilados para el llenado de frutos de mayor calidad.

LITERATURA CITADA

- AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). 2007. Mejoradores de suelo 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. 19 p.
- 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.
- Ansorena, MJ. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Madrid, España, Mundi Prensa. 167 p.
- Bar-Tal, A; Feigin, A; Sheinfeld, S; Rosenberg, R; Sternbaum, B; Rylski, I; Pressman, E. 1995. Root restriction and N-NO₃ solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato. Scientia Horticulturae 63:195-208.
- Campos, H; Trejo, C; Peña-Valdivia, CB; Ramírez-Ayala, C; Sánchez-García, P. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Scientia Horticulturae 120(4):493-499.
- Chai, Q; Gan, Y; Zhao, C; Xu, HL; Waskom, RM; Niu, Y; Siddique, KHM. 2016. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. Agronomy for Sustainable Development 36(1):3.
- Ćosić, M; Djurović, N; Todorović, M; Maletić, R; Zečević, B; Stričević, R. 2015. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of sweet pepper. Agricultural Water Management 159:139-147.
- Davies, WJ; Bacon, MA; Stuart Thompson, D; Sobeih, W; González, RL. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants' chemical signalling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. Journal of Experimental Botany 51(350):1617-1626.
- Di Benedetto, A; Tognetti, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Ria 42(1900):258-282.
- Di Rienzo, JA; Guzmán AW; 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 Environment Statistics 7(2):1-14.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency. Measurement and management. In Kraus, A; Isherwood, K; Heffer, P (eds.). Fertilizers Best Management Practices. Proceeding of International fertilizer Industry Association. Brussels, Belgium. p. 1-22.
- Duarte, J. 2019. Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*)

- hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica. Tesis Lic. Alajuela, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 83 p.
- FAO (Food agricultural Organization). 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture Water for Sustainable Food and Agriculture. *In* A report produced for the G20 Presidency of Germany. www.fao.org/publications
- Ferrara, A; Lovelli, S; di Tommaso, T; Perniola, M. 2011. Flowering, Growth and Fruit Setting in Greenhouse Bell Pepper under Water Stress. *Journal of Agronomy* 10(1):12-19.
- Fernández, M; Camacho, JF. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros* 86-89.
- Fernández, M. 2006. Eficiencia en el uso del agua en distintos sistemas hortícolas. *Tecno Ambiente: Revista Profesional de Tecnología y Equipamiento de Ingeniería Ambiental* 131-134.
- Flores, J; Ojeda, W; López, I; Rojano, I. 2007. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana* 25(2):127-134.
- Florido, M; Bao, L. 2014. Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales* 35(3):70-88.
- Gallardo, M; Thompson, RB; Valdez, LC; Fernández, MD. 2004. Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse-grown vegetable crops. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 81(3):483-495.
- García, D; Petzall, C; Castrillo, M. 2004. Respuestas al déficit hídrico en las variedades de tomate Río Grande y Pera Quibor. *Agronomía Tropical* 54(4):411-433.
- Giuliani, MM; Carucci, F; Nardella, E; Francavilla, M; Ricciardi, L; Lotti, C; Gatta, G. 2018. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 233:149-158.
- González, V; Orgaz, F; Fereres, E. 2007. Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. *Scientia Horticulturae* 114(2):77-82.
- Iqbal, S; Tak, HI; Inam, A; Inam, A; Sahay, S; Chalkoo, S. 2015. Comparative Effect of Wastewater and Groundwater Irrigation Along with Nitrogenous Fertilizer on Growth, Photosynthesis and Productivity of Chilli (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Plant Nutrition* 38(7):1006-1021.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). 2020. Anuario estadístico 2016-2018. San José, Costa Rica. 402 p.
- Ismail, MR; Davies, WJ; Awad, MH. 2002. Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants. *Scientia Horticulturae* 96(1-4):313-327.
- Jara, F. 2018. Efecto del abastecimiento hídrico en ambiente protegido sobre el rendimiento y variable morfológicas de chile (*Capsicum annuum*) y pepino (*Cucumis sativus* L.) en Heredia, Costa Rica. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional. 162 p.
- Karam, F; Masaad, R; Bachour, R; Rhayem, C; Roupshael, Y. 2009. Water and Radiation Use Efficiencies in Drip-irrigated Pepper (*Capsicum annuum* L.): Response to Full and Deficit Irrigation Regimes. *Europ. J. Hort. Sci.* 74(2):79-85.
- Khapte, PS; Kumar, P; Burman, U; Kumar, P. 2019. Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. *Scientia Horticulturae* 248:256-264.
- Kirda, C; Cetin, M; Dasgan, Y; Topcu, S; Kaman, H; Ekici, B; Derici, MR; Ozguven, AI. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 69(3):191-201.
- Kumar, P; Roupshael, Y; Cardarelli, M; Colla, G. 2017. Vegetable grafting as a tool to improve drought resistance and water use efficiency. *Front. Plant Sci.* 8:1130.
- Lahoz, I; Pérez De Castro, AM; Valcárcel-Gormes, M; Macua, JI; Beltran, J; Rosello Ripolles, S; Cebolla Cornejo, J. 2016. Effect of water deficit on the agronomical performance and quality of processing tomato. *Scientia Horticulturae* 200:55-65.
- Li, X; Kang, S; Li, F; Zhang, X; Huo, Z; Ding, R; Tong, L; Du, T; Li, S. 2017. Light Supplement and Carbon Dioxide Enrichment Affect Yield and Quality of Off-Season Pepper. *Agron. J.* 109:2107-2118.
- López, LM. 2017. Manual técnico del cultivo de tomate. San José, Costa Rica, INTA. 21 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Agrocadena Regional Cultivo Chile Dulce. San José, Costa Rica, INTA. 76 p.
- Mahadeen, A; Mohawesh, O; Al-Absi, K; Al-Shareef, W. 2011. Effect of irrigation regimes on water use efficiency and tomato yield (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in an arid environment. *Archives of Agronomy and Soil Science* 57(1):05-114.
- Mattar, MA; Zin El-Abedin, TK; Alazba, AA; Al-Ghobari, HM. 2020. Soil water status and growth of tomato with partial root-zone drying and deficit drip irrigation techniques. *Irrigation Science* 38(2):163-176.
- 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*. 191:106498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106498>
- Monge, JI. 2020. Evaluación de la morfología y fisiología de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) variedad

- Dulcítico en cultivo hidropónico bajo condiciones de invernadero. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 61 p.
- Mora, J; Echandi, C; Barrantes, L; Bonilla, K. 2018. Manual técnico basado en experiencias con el híbrido "Dulcítico" (*Capsicum annuum*). San José, Costa Rica, INTA. 84 p.
- Nangare, DD; Singh, Y; Kumar, PS; Minhas, PS. 2016. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. *Agricultural Water Management* 171:73-79.
- Nardella, E; Giuliani, M; Gatta, G; de Caro, A. 2012. Yield Response to Deficit Irrigation and Partial Root-Zone Drying in Processing Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Agricultural Science and Technology* 2:209-219.
- Nemeskéri, E; Neményi, A; Bocs, A; Pék, Z; Helyes, L. 2019. Physiological Factors and their Relationship with the Productivity of Processing Tomato under Different. *Water Technology and Sciences* 11(3):586.
- Pacheco, D. 2018. Efecto del manejo del riego sobre la morfofisiología del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) híbrido Gladiador en hidroponía bajo invernadero. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 79 p.
- Pardossi, A; Tognoni, F; Incrocci, L. 2016. Mediterranean Greenhouse Technology. *Chronica Horticulturae* 44:28-34.
- Patanè, C; Tringali, S; Sortino, O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae* 129(4):590-596.
- Peleg, Z; Apse, MP; Blumwald, E. 2011. Engineering Salinity and Water-Stress Tolerance in Crop Plants: Getting Closer to the Field. *Advances in Botanical Research* 57:405-443.
- Potters, G; Pasternak, TP; Guisez, Y; Palme, KJ; Jansen, MAK. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science* 12(3):98-105.
- Qian, T; Dieleman, JA; Elingsa, A; Marcelis, LFM. 2012. Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. *Scientia Horticulturae* 145:1-9.
- Qiu, R; Song, J; Du, T; Kang, S; Tong, L; Chen, R; Wu, L. 2013. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management* 130:44-51.
- Quesada, G. 2015. Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía Costarricense* 39(1):25-36.
- Rodríguez, R; Rázuri, L; Swarowsky, A; Rosales, J. 2014. Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Interciencia* 39(8):591-596.
- Salazar, R; Rojano, A; López, L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Water Technology and Sciences* 5(2):177-183.
- Savic, S; Liu, F; Stikic, R; Jacobsen, SE; Jensen, CR; Jovanovic, Z. 2009. Comparative effects of partial rootzone drying and deficit irrigation on growth and physiology of tomato plants. *Archives of Biological Sciences* 61(4):801-810.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2018. Boletín Estadístico Agropecuario. San José, Costa Rica. 143 p.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2):59-73.
- Soto-Bravo, F; Araya, EA; Echandi, C. 2020. 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.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2003. *Plant physiology*. 3ª edición. *Annals of Botany* 91(6):750-751.
- Tanaskovik, V; Cukaliev, O; Spalevic, V; Moteva, M; Markoski, M. 2017. Effects of irrigation and fertilization on the number of formed flower and fruits sets in pruned pepper. *Agriculture and Forestry* 61:7-17.
- Valcárcel, M; Lahoz, I; Campillo, C; Martí, R; Leiva-brondo, M; Roselló, S; Cebolla-Cornejo, J. 2019. Controlled deficit irrigation as a water-saving strategy for processing tomato. *Scientia Horticulturae* 261:108972.

