



**Efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato
sobre la dinámica del agua en el híbrido de chile dulce
(*Capsicum annuum*) cv. "Dulcítico", bajo invernadero en
Alajuela, Costa Rica.**

Elvis Ariel Araya Cubero

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE PROFESIONAL DE INGENIERO
AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

ESCUELA DE AGRONOMÍA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

AÑO 2018

**Efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre la
dinámica del agua en el híbrido de chile dulce (*Capsicum annuum*) cv.
“Dulcítico”, bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.**

Elvis Ariel Araya Cubero

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE PROFESIONAL DE INGENIERO
AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

_____ Freddy Soto Bravo, Ph.D.	Director de Tesis
_____ Luis Roberto Calvo Gamboa. M.Sc.	Miembro del Tribunal
_____ Luis Felipe Arauz Cavallini, Ph.D.	Miembro del Tribunal
_____ Carlos Echandi Guardián. M.Sc.	Miembro del Tribunal
_____ Luis Gómez Alpízar, Ph.D.	Director de Escuela de Agronomía
_____ Elvis Ariel Araya Cubero, Bach.	Sustentante

San José, 2018

Dedicatoria

A mi DIOS, por permitirme cumplir una meta académica y personal más en mi vida.

A mi madre Lorena, mi padre Elibert, mi hermana Hazel, mis hermanos Danny, Gilberto y Sebastián por el apoyo incondicional desde el inicio hasta el final en mi proceso académico.

Agradecimientos

A mi director de tesis Ph.D. Freddy Soto Bravo y al M.Sc. Carlos Echandi Guardián por confiar en mi persona para desarrollar este proyecto tan importante en mi vida.

A los miembros del tribunal M.Sc. Luis Roberto Calvo Gamboa, Ph.D. Luis Felipe Arauz Cavallini por el tiempo dedicado en este proyecto.

Al personal de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno: Julio Vega, Andrés Oviedo, Elizandro González, Marcos Bermúdez, Eduar Cubero y Javier Flores, porque sin sus aportes este proyecto no hubiere sido posible.

Manos que dan nunca estarán vacías...Gracias, Elvis !

Contenido

Lista de cuadros	6
Lista de figuras	6
Lista de anexos	8
Resumen	11
Introducción	12
Objetivos	15
Objetivos específicos	15
Marco teórico	16
El cultivo de chile dulce	16
El híbrido “Dulcítico”	16
Evapotranspiración del cultivo (ETc)	17
Eficiencia física de uso del agua (EFUA) y eficiencia económica de uso del agua (EEUA)	18
Efecto de la densidad de siembra	19
Efecto del volumen de sustrato	20
Materiales y métodos	22
1. Sitio experimental.....	22
2. Material Vegetal	22
3. Sistema de riego	22
4. Sustrato y contenedor	23
5. Fertirriego.....	25
6. Protección de cultivos	26
7. Prácticas culturales	26
8. Descripción de tratamientos	27
9. Diseño y unidad experimental	28
10. Condiciones climáticas.....	30
11. Variables de respuesta.....	31
Evapotranspiración del cultivo (ETc)	31
Eficiencia física de uso del agua (EFUA)	33
Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)	33
12. Análisis estadístico.....	34
Resultados	36
Evapotranspiración del chile dulce (ETc)	36
Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del chile dulce	36
Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del chile dulce....	37

Eficiencia física de uso del agua (EFUA)	37
Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce	38
Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce	38
Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)	39
Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia económica de uso del agua del chile dulce.....	39
Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia económica de uso del agua del chile dulce.....	40
Discusión	42
Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del chile dulce.	42
Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del chile dulce....	43
Eficiencia física de uso del agua (EFUA)	45
Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce.	45
Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce.	47
Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)	47
Efecto de la densidad de siembra sobre la EEUA del chile dulce.	48
Efecto del volumen de sustrato sobre la EEUA del chile dulce.	48
Conclusiones	49
Recomendaciones	50
Literatura consultada	51
Anexos	57

Lista de cuadros

Cuadro	Título	Página
1	Características físicas y químicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce.	24
2	Concentración de nutrientes (mg L^{-1}) en solución nutritiva según etapas fenológicas del cultivo de chile dulce bajo invernadero, Alajuela, 2017.	25
3	Descripción de tratamientos utilizados según densidad de siembra y volumen de sustrato.	27
4	Formato de análisis de la variancia (ANDEVA) para factorial 2 x 3.	35

Lista de figuras

Figura	Título	Página
1	Diseño de bloques completos al azar en un arreglo factorial 2 x 3, de los tratamientos combinados con dos densidades de siembra y tres volúmenes de sustrato, en chile dulce "Dulcítico", bajo invernadero, Alajuela, Costa Rica, 2016.	29
2	Valores promedio, mínimo y máximo de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica.	30
3	Radiación solar total (MJ m^{-2}) dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica.	31

4	Bandeja de recolección de drenaje (A) y cobertura de la bandeja para evitar la evaporación (B).	32
5	Sensor TDR (Time Domain Reflectometry), GS3 Decagon Devices para medir el contenido de humedad volumétrica en el sustrato.	33
6	Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del cultivo (ET _c , L m ⁻²) de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	36
7	Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del cultivo (ET _c , L m ⁻²) de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	37
8	Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua (EFUA, kg m ⁻³) en el cultivo de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	38
9	Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua (EFUA, kg m ⁻³) en el cultivo de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	39

10	Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia económica de uso del agua (EEUA, $\text{C} \text{ m}^{-3}$) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”; Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).	40
11	Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia económica de uso del agua (EEUA, $\text{C} \text{ m}^{-3}$) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).	41

Lista de anexos

Anexo	Título	Página
1	Precios de moda semanal según categoría de fruto comercial de chile dulce.	57
2	Volumen de riego acumulado (L m^{-2}) durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	57
3	Volumen de drenaje acumulado (L m^{-2}) durante todo el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	58
4	Contenido de humedad volumétrica (%) para cada tratamiento, durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica.	58
5	Humedad volumétrica del sustrato por planta manejado durante todo el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” para cada tratamiento en Alajuela, Costa Rica.	59

6	Prueba de Levene para la variable evapotranspiración del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	59
7	Prueba de Levene para la variable eficiencia física de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	59
8	Prueba de Levene para la variable eficiencia económica de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	60
9	Análisis de la variancia para la variable evapotranspiración del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	60
10	Análisis de la variancia para la variable eficiencia física de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	61
11	Análisis de la variancia para la variable eficiencia económica de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.	62
12	Rendimiento comercial (kg m ⁻²) del factor densidad de siembra, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	63
13	Rendimiento comercial (kg m ⁻²) por tratamiento, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).	63
14	Rendimiento comercial (kg m ⁻²) por tratamiento, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error	64

estándar de la media y medias con letras distintas
presentan diferencias estadísticamente
significativas ($P < 0,05$).

Ingreso económico (¢ m⁻²) por tratamiento, en el
cultivo de chile dulce "Dulcítico", Alajuela, Costa
Rica, 2016. Barras verticales indican el error
estándar de la media y medias con letras distintas
presentan diferencias estadísticamente
significativas ($P < 0,05$).

Resumen

El trabajo se realizó bajo invernadero, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en la Garita de Alajuela, durante los meses de abril y setiembre del año 2016. Se evaluó el efecto de dos densidades de siembra (1,4 y 2,4 plantas m^{-2}) y tres volúmenes de sustrato (7, 14 y 21 L planta $^{-1}$) sobre la dinámica del agua en el híbrido de chile dulce "Dulcítico". Se utilizó un diseño experimental de tres bloques completos al azar con un arreglo factorial de tratamientos 2 x 3. Las variables de respuesta fueron: evapotranspiración del cultivo (ETc), eficiencia física de uso del agua (EFUA) y eficiencia económica de uso del agua (EEUA). La ETc se obtuvo mediante un balance de agua en el sustrato, la EFUA como resultado del cociente del rendimiento entre la ETc y la EEUA mediante el cociente del valor económico del rendimiento entre la ETc. Para dichas variables no hubo efecto de la interacción entre factores, aunque sí hubo efecto independiente de ambos factores. En la ETc, a mayor densidad de siembra y volumen de sustrato, mayor fue el consumo de agua, obteniéndose valores de 216,05 y 303,43 L m^{-2} para 1,4 y 2,4 plantas m^{-2} y 246,6, 257,13, y 275,48 L m^{-2} para 7, 14 y 21 L planta $^{-1}$. Para EFUA y EEUA, a menor densidad de siembra y volumen de sustrato, mayor fue la eficiencia de uso del agua obteniéndose valores de 24,05 y 21,41 kg m^{-3} para 1,4 y 2,4 plantas m^{-2} y 23,77, 23,54 y 20,87 kg m^{-3} para 7, 14 y 21 L planta $^{-1}$ para EFUA y de 24 926,8 y 22 054,8 ¢ m^{-3} para 1,4 y 2,4 plantas m^{-2} y 24 237,2, 24 461,9 y 21 772, 8 ¢ m^{-3} para 7, 14 y 21 L planta $^{-1}$ para EEUA. Al considerar solo el efecto del volumen de sustrato no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos de 7 y 14 L planta $^{-1}$ para las 3 variables. El mejor tratamiento fue 2,4 plantas m^{-2} con un volumen de 7 L planta $^{-1}$ ya que la densidad alta obtuvo un rendimiento por área superior a la densidad baja y los dos volúmenes de sustrato bajos fueron los que obtuvieron los valores de EFUA y EEUA más elevados; sin embargo, por cuestión de costos el volumen de 7 L planta $^{-1}$ es mejor que 14 L planta $^{-1}$.

Introducción

En la actualidad deben existir soluciones para gestionar el recurso hídrico y compensar los crecientes desafíos a la seguridad del agua desde el crecimiento de la población y el cambio climático, ya que la demanda de agua aumentará en todos los sectores. El desafío existe y se debe enfrentar satisfaciendo las demandas de una manera que no tenga impactos negativos en los ecosistemas. Hay riesgos muy importantes como inundaciones y sequías que pueden provocar disturbios civiles, migración masiva y conflictos entre países (WWAP 2018).

La población mundial tiene un crecimiento rápido; se espera que para el año 2050 la demanda de agua aumente casi un tercio y la población mundial aumente de 7,7 mil millones en 2017 a 9,4 y 10,2 mil millones para el 2050. La agricultura demanda el 70 % del agua mundial para usarla en irrigación, las estimaciones anuales de demanda de agua para riego presenta incertidumbre, ya que estas dependen de los cultivos, sus etapas de crecimiento, prácticas en el cultivo, sistemas de producción, las técnicas de riego y en mayor medida de las condiciones climáticas (WWAP 2018).

El inminente aumento de la población mundial provoca que la agricultura enfrente el reto de ser más productiva y eficiente en el uso de los recursos utilizados, especialmente agua y nutrientes, siendo estos últimos los factores más limitantes de la producción de alimentos y que ante un cambio climático global toman cada vez más importancia. Debido a esto debemos saber la cantidad de agua que necesitamos para producir los alimentos y la eficiencia de la misma (Arévalo 2015).

Independientemente del aumento en la demanda del agua para riego, el cumplir con un aumento estimado de 60% en la demanda de alimentos requiere de la expansión de áreas cultivables y de una mayor alteración en explotación de suelos, uso de agroquímicos, energía y agua (WWAP 2018).

Algunas ventajas de los cultivos sembrados en hidroponía son: las raíces tienen humedad constante independientemente del clima, reduce el riesgo por exceso de irrigación, evita el gasto descontrolado de agua y fertilizantes, reduce incidencia de enfermedades del suelo, aumenta los rendimientos, mejora la

calidad del producto y utiliza poco espacio (Jara 2016).

La producción en invernadero permite producir hortalizas en zonas que tradicionalmente no son aptas para el cultivo, permite incrementar el rendimiento por área, reducir aplicaciones de agroquímicos, producir durante todo el año, aumentar la calidad del producto y mejorar la rentabilidad económica (Rojas y Paniagua 2015).

Para el año 2014, en Costa Rica existieron 2365 fincas con chile dulce, con una extensión de 1 086,6 hectáreas (INEC 2015). De esta área, Rojas y Paniagua (2015) mencionan que solamente 158 hectáreas fueron bajo ambientes protegidos. El mercado nacional de chile dulce en Costa Rica requiere de frutos cónicos de punta alargada y con pesos de 150-350 g y de color rojo. El aumento en este país del consumo y producción bajo condiciones de invernadero ha promovido la ampliación de las superficies de siembra, mejorar las técnicas y renovar los genotipos vegetales (Elizondo y Monge 2016). El cultivo de chile dulce y tomate en Costa Rica generan aproximadamente 5000 empleos directos y hasta 20 000 empleos indirectos debido a su intensivo manejo (López 2014). Aunque no existe una estacionalidad en el consumo de chile dulce en los hogares, se estima que el consumo per cápita anual es de 1,59 kg, registrándose un incremento en el consumo de 2,1 % en el 2000 a 4% en el año 2004 (MAG 2007) y para el año 2012 (PIMA-CENADA 2015) menciona que fue de 3,3 kg.

El híbrido "Dulcítico" es el primer híbrido nacional desarrollado en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica. El rendimiento, color, forma, firmeza y costo de la semilla son favorables para este material, en comparación con los demás híbridos comerciales que se encuentran en el país (Quirós y Villalobos 2014).

Existe la tecnología para hacer un uso eficiente del agua y de los fertilizantes, pero esta no se aprovecha por lo que se aplican cantidades altas de agua y fertilizantes basadas en conocimientos empíricos, sin aprovechar la técnica de hidroponía bajo invernadero (¹Soto 2015).

Los volúmenes de sustrato utilizados normalmente para chile dulce son de 5-7 litros por planta, pero estos volúmenes pueden ser insuficientes para las condiciones tropicales de Costa Rica, ya que las temperaturas del sustrato

¹Soto, F. 2015. Producción de chile dulce bajo invernadero (entrevista). Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Programa de hortalizas UCR.

aumentan considerablemente por lo que las cantidades de oxígeno en la interface aire-agua disminuyen y la respiración de la raíces se ven afectadas, así el rendimiento podría disminuir (¹Soto 2015). El rango de densidades de siembra utilizados en Costa Rica para chile dulce es de 1,4 a 2,4 plantas por metro cuadrado considerando las siembras a campo abierto y en invernadero (¹Soto 2015).

La evapotranspiración, como variable hidrológica, es fundamental para cualquier estudio relacionado con el manejo del agua de riego; con esta se puede determinar cuándo y cuánta agua de riego suministrar a un cultivo, reduciendo gastos de agua y aumentando su calidad y productividad. (Pérez y Castellví 2002).

Al no existir información técnica sobre las necesidades de riego del chile dulce en Costa Rica, tomando en cuenta factores como el volumen de sustrato, densidad de siembra, genotipo y sistema de producción, se realizó un balance de agua en el sustrato por método directo con lisímetros, para determinar la evapotranspiración del cultivo, la eficiencia física de uso del agua y la eficiencia económica de uso del agua. Así se puede contar con información de máxima utilidad para decidir cuál es el uso más efectivo de los recursos hídricos en nuestros sistemas de producción.

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre la dinámica del agua en el híbrido de chile dulce (*Capsicum annuum*) cv. "Dulcítico", bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.

Objetivos

Objetivo general

- Evaluar el efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre la dinámica del agua en el híbrido de chile dulce (*Capsicum annuum*) cv. "Dulcítico" bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.

Objetivos específicos

- Determinar si la evapotranspiración del cultivo (ETc) del híbrido de chile dulce "Dulcítico" en respuesta a dos densidades de siembra, varía con el incremento del volumen de sustrato.
- Determinar si la eficiencia física de uso del agua (EFUA) del híbrido de chile dulce "Dulcítico" en respuesta a dos densidades de siembra, varía con el incremento del volumen de sustrato.
- Determinar si la eficiencia económica de uso del agua (EEUA) del híbrido de chile dulce "Dulcítico" en respuesta a dos densidades de siembra, varía con el incremento del volumen de sustrato.

Marco teórico

El cultivo de chile dulce

El chile dulce (Familia: Solanácea. Género: *Capsicum*. Especie: *annuum*) es originario de las zonas tropical y subtropical de América. Los climas cálidos y secos con temperaturas entre 15 y 30 °C, humedades relativas entre 70 y 90 %, y altitudes desde 300 a 2000 msnm, son las condiciones para su crecimiento (Martínez 2003). El agua de riego debe tener rangos de pH y conductividad eléctrica de 5,5 a 6 y 1 a 2,5 mS cm⁻¹, respectivamente; los rangos de riego pueden estar entre 1 y 8 L m⁻² (Alarcón, 1995).

El híbrido “Dulcítico”

En diciembre del año 2013 se liberó el híbrido “Dulcítico” desarrollado en Costa Rica y del cual los productores pueden contar con semilla. Las características de este híbrido son: días a inicio de cosecha 100 a 130, crecimiento indeterminado, forma de fruto cónica, color verde-rojo, sabor dulce (Estrada 2013), rendimiento de 9,55 kg.m⁻² (Echandi 2012) y para invernadero 4,5 kg m⁻² (MAG 2014).

El híbrido que utiliza el 90% de los productores nacionales es “Nathalie”. En un ensayo, Ramírez *et al.* (2018) comparó el rendimiento de “Dulcítico” con el híbrido comercial “Nathalie” en 13 cosechas y se obtuvieron 5,69 y 5,4 kg m⁻², respectivamente. MAG (2014) reporta que el rendimiento de “Dulcítico” es un 20% más que el “Nathalie” y tiene más grados Brix en las frutas.

Algunos de los beneficios del “Dulcítico” son: a) económicos, ya que se dependía de semilla importada la cual se estima que tiene un 8% del costo de producción (para 1 hectárea); b) la semilla de este híbrido tiene un costo menor por lo que este rubro será más bajo, c) sociales, ya que los ingresos generados por la semilla se reinvierten para investigación a nivel nacional y d) ambiental, ya que el material demuestra un buen comportamiento contra hongos por lo que el uso de agroquímicos disminuye (Estrada 2013).

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

En las plantas, el agua transpirada es utilizada para producir biomasa (ramas, tallos, hojas y frutos) y controlar la temperatura de la planta. El agua se repone en todos los tejidos mediante la extracción por medio de las raíces (Pastor y Hidalgo 2002). El agua perdida por transpiración desde la cubierta vegetal de las plantas, más la que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo, es lo que se conoce como evapotranspiración del cultivo o el consumo de agua (Pastor y Hidalgo 2002). En el componente evaporación se da un cambio de estado del agua líquida a gaseosa que requiere altas cantidades de energía proporcionadas por la radiación solar y el aire que circula en la superficie (Santos *et al.* 2010). Esta variable no es fácil de medir ya que se necesita aparatos específicos y mediciones precisas de parámetros físicos o por medio del balance de agua en el suelo, por medio de lisímetros (método directo). El método del caculo de ETc con lisímetros es el más exacto (Pérez y Castellví 2002). Los lisímetros de drenaje son recipientes en los que se recolecta el agua drenada de la totalidad de agua regada (Allen *et al.* 2006). La ecuación del balance hídrico se presenta a continuación (Feller 1981, citado por Huber *et al.* 1998).

$$ETc = R \pm \Delta H - D$$

Dónde:

ETc = Evapotranspiración del cultivo

R = volumen de riego

$\pm \Delta H$ = variaciones de la humedad volumétrica en el suelo

D = volumen de drenaje.

Los sensores más adecuados para medir la humedad volumétrica del suelo para sistemas de cultivo hortícola en invernadero son los sensores dieléctricos, de los cuales hay dos tipos: TRD (Time Domain Refractometry) y los FDR (Frequency Domain Refractometry). Los TDR se componen de barras de acero inoxidable y se usan comúnmente en investigación (Fernández *et al.* 2012).

Eficiencia física de uso del agua (EFUA) y eficiencia económica de uso del agua (EEUA)

Los rendimientos por unidad de agua de los sistemas hidropónicos en invernadero son más altos que los sistemas en suelo para campo abierto. La principal ventaja de esto es la reducción en la cantidad de agua a usar y la pérdida de nutrientes al ambiente (Putra y Yuliando 2015).

Existen dos tipos de productividad del agua o eficiencia de uso del agua: La eficiencia física o productiva, la cual es el cociente entre la producción y el volumen de agua de riego aplicado (kg m^{-3}) y la económica, que es el cociente entre el ingreso económico y el volumen de agua de riego aplicada (€ m^{-3}) (Gallardo *et al.* 2007). La eficiencia física y económica también puede calcularse como el cociente entre la producción o ingreso económico entre la ETc (kg m^{-3}) (Wang *et al.* 2009). Ambos tipos de eficiencias son indicadores agronómicos de elevada importancia para zonas con el recurso agua limitado y que permite gestionar cómo el valor económico del agua puede maximizarse (Gallardo *et al.* 2007).

Los dos tipos de eficiencias en cultivos hortícolas son significativamente más elevados que las de los cultivos a campo abierto por dos motivos: el clima dentro de los invernaderos que reduce la evaporación y los rendimientos superiores. Ejemplo: los cultivos hortícolas en invernadero obtienen eficiencias físicas y económicas de uso del agua de 24 a 37 kg m^{-3} y de 8 a 21 € m^{-3} respectivamente mientras que en cultivos a campo abierto obtienen valores de 7,4 a 17 kg m^{-3} y de 0,14 a 1,6 € m^{-3} respectivamente. Los valores de eficiencia económica depende del precio de mercado del producto (Gallardo *et al.* 2007).

La eficiencia del agua depende del sistema de riego utilizado; el sistema de riego localizado o por goteo requiere menos agua que los sistemas de riego por aspersión o por superficie, ya que al humedecer solo una parte del suelo se reduce la evaporación y al mismo tiempo es más fácil reducir las pérdidas de agua por drenaje al realizar riegos más frecuentes y de menor volumen (Gallardo *et al.* 2007).

Dentro de un invernadero hay reducciones de radiación solar y velocidad del viento, además aumentos de humedad relativa en comparación con el exterior por lo que las necesidades de riego son menores (hasta un 50%). El efecto del clima sobre el consumo de agua es alto por lo que la duración del ciclo del cultivo y el periodo del año en que se siembra deben ser considerados, siendo los ciclos largos y los periodos más frescos los que aumentan el valor de esta variable (Gallardo *et al.* 2007).

Efecto de la densidad de siembra

Diferentes ensayos de campo demuestran que al aumentar la densidad de siembra del cultivo, la evapotranspiración del cultivo aumenta; por ejemplo, Pastor y Hidalgo (2002) investigando en el cultivo de olivares, mencionan que la demanda de agua varía de forma muy sensible a la densidad de plantas y al tamaño de las mismas. Huber *et al.* (1998) trabajando en Eucalipto, mencionan que existe una relación inversa entre el agotamiento de las reservas de agua en el suelo y la densidad de árboles. Huber y Treacaman (2004) en árboles de pino obtuvieron los mismos resultados al probar 1250 y 750 árboles ha⁻¹.

Las densidades altas aumentan la producción y acumulación de materia seca como resultado del alto porcentaje de radiación interceptada, pero las densidades altas bajan el rendimiento por planta por competencia de la luz, pérdida excesiva de agua por transpiración y ataques de plagas o enfermedades (Campos 2016).

Estudios en densidad de siembra para varios tipos de chile han demostrado que la densidad de plantas y el arreglo de plantas influyen sobre el crecimiento y desarrollo de todos los órganos de la planta, afectando así el rendimiento (Khasmakhi *et al.* 2009, citado por Hossein *et al.* (2012). El aumento de la densidad de población en pimiento disminuye el rendimiento por planta pero incrementa el rendimiento por unidad de área (Cruz *et al.* 2009). Por ejemplo, Zuñiga *et al.* (2004) probó en pimiento, tres densidades de siembra y la más alta obtuvo los valores más elevados de tasa de crecimiento, altura de la planta y rendimiento por área, Campos (2016) obtuvo el doble de rendimiento por área al comparar 5,3 y 2,8 plantas m⁻². Hosein *et al.* (2012) probó en chile el efecto de cuatro densidades de siembra: 10, 6.6, 5 y 3.3 plantas m⁻² y los rendimientos se

comportaron de forma lineal, decreciendo de mayor a menor densidad. Hamid (1985) probó cinco densidades de siembra en tomate y los resultados de rendimiento por área se comportaron linealmente, siendo el más denso el de mejor rendimiento por área; similares resultados obtuvo Peil y Gálvez (2004) pero con tres densidades de siembra.

Efecto del volumen de sustrato

La mayor limitación a considerar para la producción de plantas en contenedores es el confinamiento que sufren las raíces y todas las restricciones que esto provoca. En un volumen limitado, las raíces se densifican para poder satisfacer las necesidades de la parte aérea presentando una demanda mucho mayor de oxígeno por unidad de volumen en la rizósfera. El sustrato debe proveer suficiente agua y volumen de aire por lo que la porosidad del mismo está relacionada con la disponibilidad de oxígeno necesario para la respiración de las raíces y con un correcto intercambio de gases en la rizósfera (Vence 2008).

Moreno *et al.* (2010) demostraron en plantas de pepino que crecieron en volúmenes de sustrato mayores obtuvieron valores más altos de: área foliar, concentración de N y K en las hojas, peso seco foliar, longitud de raíz, volumen de raíz y peso seco de raíz. Estos resultados son probablemente efecto de que la raíz creció con menos limitaciones de oxígeno en la rizósfera, agua y nutrientes al utilizarse contenedores con sustrato más amplios (Moreno *et al.* 2010).

En volúmenes reducidos de sustrato, plantas de tomate incrementaron la producción de etileno y estas produjeron raíces adventicias. Sumado a esto las raíces en volúmenes de sustrato reducidos respiraron 10 veces menos que las producidas en contenedores de mayor volumen. La restricción de espacio para la raíz redujo el suministro de oxígeno para la respiración radical (Peterson *et al.* (1991), Wien 1991, citados por Moreno *et al.* 2010).

Variables como: longitud de raíz, peso seco raíz, altura de la planta, diámetro de tallo, pares de hojas y peso seco de follaje, obtuvieron valores más elevados en el cultivo de café al sembrar las plantas en volúmenes de sustrato mayores

(Arizaleta y Pire 2008); similar resultados obtuvieron para el cultivo de lechuga Salusso *et al.* (2016).

Montero *et al.* (2010) obtuvieron un incremento del peso fresco de los frutos de chile dulce y este lo relacionaron con el incremento de la materia seca de las raíces al explorar un volumen mayor de sustrato y absorber con mayor facilidad el agua y los nutrientes mejorando así la productividad. La interacción de los factores volumen de sustrato (9, 18 y 33 litros) y concentraciones de nutrientes fue desarrollada por Xu y Kafkafi (2001) donde demostraron que el mayor volumen de sustrato con las dosis más altas de nutrientes mostró diferencias significativas en el número de frutos por planta y el rendimiento total. Fallas (2017) en este presente estudio, determinó el efecto de los mismos tratamientos sobre el rendimiento y la única variable con diferencias significativas para los tres volúmenes de sustrato fue el peso promedio del fruto el cual fue mayor en 14 y 21 L plantas⁻¹ con respecto a 7 L plantas⁻¹.

El oxígeno, como nutriente no mineral es esencial para el desarrollo de la raíces y por lo tanto del follaje y determinante del rendimiento. Las condiciones de hipoxia en la interface aire:agua pueden aumentar al incrementarse las temperatura diurnas del sustrato y este hecho se agrava al disminuir el volumen de sustrato por lo que la producción se puede afectar (¹Soto 2015). Por otra parte Xu y Kafkafi (2001) obtuvieron mayores rendimientos en chile dulce al aumentar el volumen de sustrato, mencionan que debido al efecto de la temperatura más elevada durante la noche en el sustrato de mayor volumen durante todo el ciclo. En la mayoría de los casos estos factores son ignorados en la producción hortícola de chile utilizándose volúmenes de 5 a 7 L planta⁻¹, comúnmente utilizados en climas no tropicales como Norte América, Europa e Israel (¹Soto 2015).

¹Soto, F. 2015. Producción de chile dulce bajo invernadero (entrevista). Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Programa de hortalizas UCR.

Materiales y métodos

1. Sitio experimental

El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), ubicada en el distrito San José de Alajuela, Costa Rica (10° 00' 24' N y 84° 15' 57' W) a una altitud de 840 msnm, con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, 22°C y 78%, respectivamente.

El cultivo se desarrolló en un invernadero orientado de este-oeste, con un área total de 1440 m², de la cual se utilizaron 200 m², una altura de 6,5 m al centro del túnel y 5 m a la canaleta. La siembra se realizó el 22 de abril del 2016 y finalizó el 28 de agosto del 2016 para un total de 18 semanas de cultivo.

2. Material Vegetal

El cultivo utilizado fue el híbrido nacional de chile dulce "Dulcítico" (98% pureza y 80% germinación mínima) el cual se trasplantó utilizando plántulas de 37 días de edad con 6 hojas verdaderas producidas en bandejas plásticas de 98 celdas con peat moss (turba) como sustrato.

3. Sistema de riego

El sistema de riego consistió de cuatro tanques plásticos con una capacidad de 2500 litros cada uno, donde se almacenaron las soluciones nutritivas diluidas. Los tanques estaban conectados por medio de tubería de polietileno a una bomba eléctrica (FORAS PM 115 de 1 HP), la cual impulsó la solución nutritiva a una presión constante de 15 PSI, está controlada por una llave de paso y un manómetro con glicerina (GENEBRE CL 2,5), a través de polietileno y conectando a un filtro de mallas. Del filtro se distribuyó al invernadero por una tubería principal que al llegar dentro del invernadero conectaba con 6 válvulas solenoides (NAANDANJAIN mod S390 2WR) con reguladores de flujo para dividir el sistema de riego en 6 sectores (1 por tratamiento).

Estas válvulas solenoides fueron controladas por medio de dos timers (TORO mod TMC 212). Cada válvula conectó con una línea de tubería sectorial que

cubría el ancho (13,95 m) de la plantación y de esta tubería sectorial se colocaron los laterales de riego de polietileno virgen (20 x 1,6 mm) los cuales medían el largo (14,3 m) de la plantación.

Los goteros utilizados fueron de la marca NAANDANJAIN con sistema antidrenaje y autocompensado de un caudal de 3 L H⁻¹; estos se colocaron uno por planta sobre los laterales. A estos goteros se les colocó un distribuidor de 4 salidas de la marca NAANDANJAIN donde se colocó a 4 microtubos (5,5 x 3 mm) de 60 cm de largo, al final de estos se colocó una estaca de espiga corta sin regulador de caudal de la misma marca. Con este sistema, a cada planta se le colocó 4 estacas, formando un cuadro para tener una buena distribución del volumen de riego.

4. Sustrato y contenedor

El sustrato utilizado fue fibra de coco de textura media (marca Fico) en presentación de bloques comprimidos de 100 x 15 x 3 los cuales fueron hidratados según las recomendaciones técnicas del proveedor. Las características físicas y químicas de dicho sustrato se presentan en el Cuadro 1.

Como contenedor se utilizó una bolsa plástica blanca elaborada a partir de 50% resina virgen y 50 % material de reciclaje, de 8 milésimas de espesor, elaborada en la empresa Industrial Vinachs.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce.

<u>Parámetro</u>	<u>Cantidad</u>
Características Físicas	
Sustrato o materia seca (%)	10
Aire (%)	35
Agua en saturación (%)	55
Agua fácilmente disponible (%)	80 (44)
Agua de reserva (%)	15 (8,25)
Agua difícilmente disponible (%)	5 (2,75)
Densidad aparente (g/L)	55-60
Partículas mayores a 4 mm (%)	25
Partículas entre 1 y 4 mm (%)	58
Partículas entre 0,25 y 1 mm (%)	16
Partículas inferiores a 0,25 mm (%)	1
Características Químicas	
CE (mS/cm)	0,7
pH	5,7
C.I.C. (meq/100 gr)	66-67
Relación C/N	70-80
Macroelementos (mmol/L)	
NH ₄ < 0,1	NO ₃ = 2,6
K = 3,3	Cl = 3,2
Na = 2,1	SO ₄ = 0,1
Ca = 0,2	HCO ₃ < 0,1
Mg = 0,1	P < 0,01
Microelementos (µmol/L)	
Si = 0,17	B = 4,1
Fe = 3,2	Cu = 0,1
Mn = 0,2	Mo < 0,1
Zn = 0,2	

5. Fertirriego

La fertilización se inició al día siguiente del trasplante por medio de fertirriego proporcional, con sales disueltas (solución acidificada a pH 5,5 con ácido nítrico), donde se dividió el ciclo del cultivo en 4 etapas para proporcionar las siguientes concentraciones de nutrientes (Cuadro 2). Las sales comerciales utilizadas fueron: fosfato monopotásico, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, nitrato de calcio, cloruro de calcio, ácido nítrico, fertrilon combi 1, EDTA Fe, EDTA Mn y ácido bórico.

Cuadro 2. Concentración de nutrientes (mg L^{-1}) en solución nutritiva según etapas fenológicas del cultivo de chile dulce bajo invernadero, Alajuela, 2017.

Etapa fenológica	Duración (semana)	Elemento y concentración (mg L^{-1})												
		N	P	K	Mg	Ca	S	Cl	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo
Establecimiento	2	129	40	182	39	140	65	1	1	0	1	0	1	0
Desarrollo vegetativo y radicular	4	141	47	204	46	150	75	1	2	0	1	0	1	0
Crecimiento-Inicio producción	4	152	46	260	51	172	104	1	2	0	1	0	1	0
Producción	8	159	50	287	51	181	113	1	2	0	1	0	1	0

La frecuencia y volumen de los riegos, se definieron diariamente según parámetros de pH del drenaje (5,5 a 6,2), CE del drenaje ($0,75$ a 3 mS m^{-1}), drenaje de la planta por día (5 a 30%), humedad volumétrica en el sustrato (35 a 60%) (Anexo 4), etapa fenológica del cultivo y las condiciones climáticas. La cantidad de riegos diarios por tratamiento, estuvieron en el rango de 4 a 24.

6. Protección de cultivos

Antes de colocar el sistema de riego y establecer el cultivo se realizó una desinfección general del invernadero con el ingrediente activo peróxido de hidrógeno.

El manejo fitosanitario se hizo de manera convencional con aplicaciones de productos biológicos de contacto como *Trichoderma lignoum* (tres aplicaciones al sustrato cada siete días después del trasplante), *Beauveria bassiana* (dos aplicaciones foliares por semana durante todo el ciclo), *Isaria fumosorosea* (dos aplicaciones foliares por semana durante todo el ciclo), *Metarhizium anisopliae* (una aplicación foliar por semana durante todo el ciclo).

Las aplicaciones químicas consistieron en tiametoxam (1 aplicación en drench a los 2 días después del trasplante), Rooting (3 aplicaciones al sustrato cada 7 días después del trasplante), ftalimida (1 aplicación foliar cada 15 días desde los 45 a los 121 días después del trasplante), bifentrina (1 aplicación foliar por semana durante las 4 semanas que hubo adultos de mosca blanca), tiociclám oxalato (1 aplicación foliar por semana durante las 4 semanas que hubo adultos de mosca blanca), spiromesifen (3 aplicaciones foliares a los 30, 60 y 90 días después del trasplante) y buprofezin (3 aplicaciones a los 45, 75 y 100 días después del trasplante).

7. Prácticas culturales

El tutorado de las plantas los primeros 45 días se realizó con mecate de nylon negro y anillos plásticos que se colocaron en la primera y segunda bifurcación de la planta. Después de este periodo se utilizaron tiras de nylon blanco con las cuales se sujetaba el follaje de la planta a una cuerda horizontal colocada en la parte superior del cultivo.

Al cultivo se le eliminaron los hijos desde la primera bifurcación hacia abajo y se dejó a crecimiento libre de guías, solamente se realizó una deshoja sanitaria a los 105 días después del trasplante.

8. Descripción de tratamientos

En un periodo de 18 semanas se evaluó el efecto de los factores densidad de siembra y el volumen de sustrato por planta sobre la dinámica del agua en el híbrido de chile dulce “Dulcítico” bajo condiciones de invernadero. Para el factor densidad de siembra se utilizaron dos tratamientos que corresponden a 1,4 plantas m^{-2} (0,45 m x 1,55 m) y 2,4 plantas m^{-2} (0,27 m x 1,55 m) que son las densidades utilizadas por productores bajo condiciones de campo e invernadero respectivamente. Para el factor volumen de sustrato por planta se utilizaron tres tratamientos que corresponden a 7, 14 y 21 litros de fibra de coco por bolsa. Los seis tratamientos combinados se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Descripción de tratamientos utilizados según densidad de siembra y volumen de sustrato.

Leyenda	Densidad (plantas m^{-2})	Volumen de sustrato planta⁻¹ (L)
D 1,4 X V 7	1,4	7
D 1,4 X V 14	1,4	14
D 1,4 X V 21	1,4	21
D 2,4 X V 7	2,4	7
D 2,4 X V 14	2,4	14
D 2,4 X V 21	2,4	21

Después de haber hidratado la fibra de coco, esta se descomprimió para obtener la fibra suelta y se procedió a llenar las bolsas de los tres tamaños. Los cuales fueron: 33 cm x 26 cm (7 L), 41 x 35 cm (14 L) y 43 x 40 cm (21 L) para el lado de la abertura y la altura respectivamente; con estas dimensiones se mantuvo una relación altura: diámetro de 1:1.

Estas bolsas se colocaron dentro del invernadero según la densidad correspondiente para luego realizar el trasplante (una plántula por bolsa). Después de haber trasplantado todo el material se colocaron las cuatro estacas del sistema de riego prensando la tapa de la bolsa de forma que solamente quedara expuesto un pequeño hueco en forma de cuadro por donde salía el tallo.

Para favorecer el drenaje en cada bolsa, se realizaron cuatro cortes circulares de 5 mm de diámetro.

9. Diseño y unidad experimental

El diseño utilizado fue de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 2 x 3, combinando 2 factores de densidad de siembra y 3 factores de volumen de sustrato por planta para un total de 6 tratamientos combinados (Cuadro 3).

Se utilizaron 3 repeticiones por tratamiento para un total de 18 unidades experimentales. La unidad experimental estuvo conformada por 3 hileras de 9 plantas para un total de 27 plantas en la densidad baja y de 3 hileras de 13 plantas para un total de 39 plantas en la densidad alta (Figura 1).

De estas 27 y 39 plantas fueron utilizadas por tratamiento como parcela útil las 7 plantas ubicadas en el centro de la unidad experimental ya que la parcela útil estuvo ubicada en el centro de dos hileras de borde y con plantas borde en los extremos de la hilera (2 plantas en densidad baja y 6 plantas en densidad alta).

El área de cada unidad experimental fue de 5,4 m² y se colocó una hilera borde extra en el costado este del invernadero para mitigar el efecto borde causado por la cercanía del cultivo a la malla del invernadero.

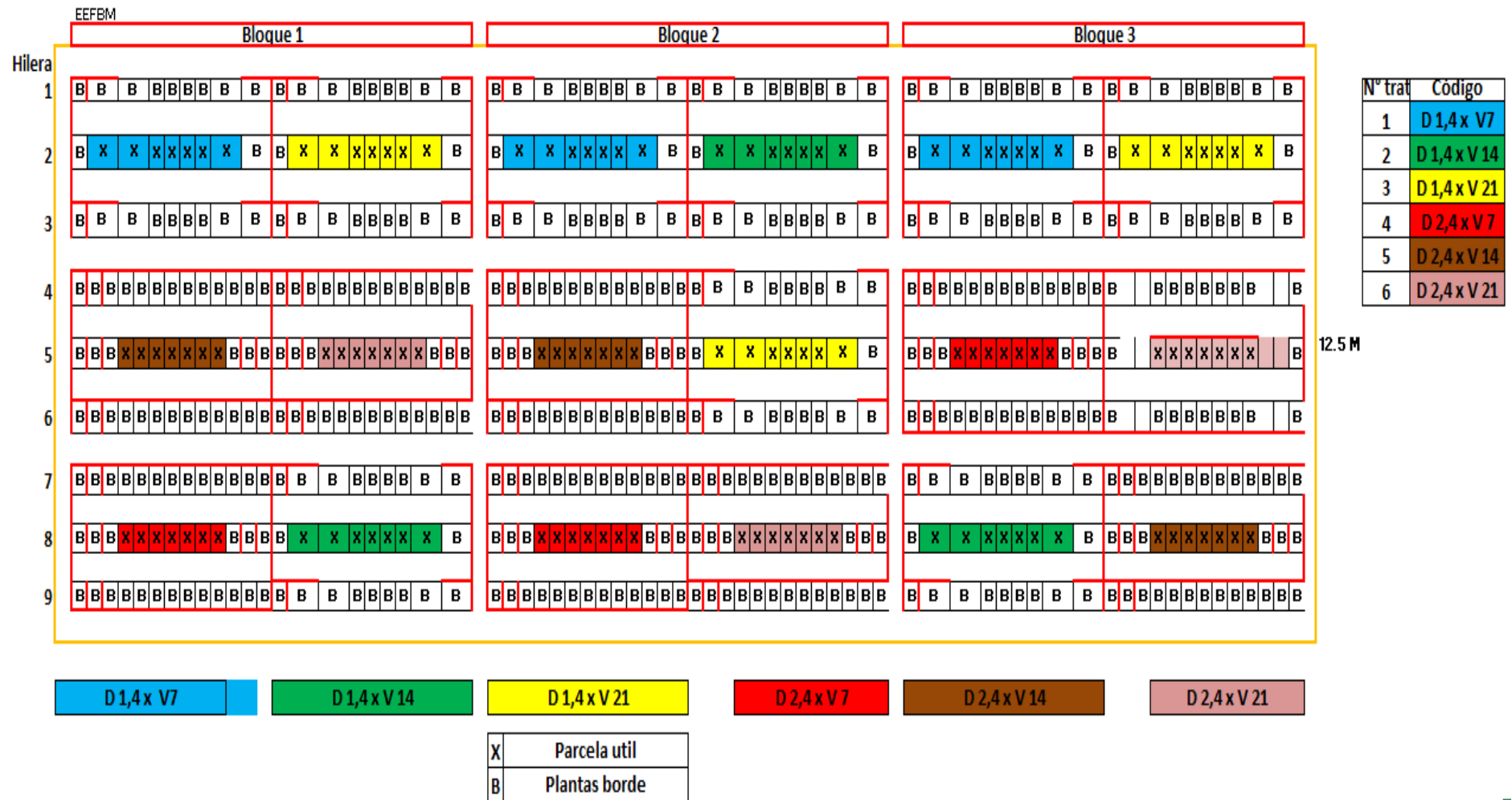


Figura 1. Diseño de bloques completos al azar en un arreglo factorial 2 x 3, de los tratamientos combinados con dos densidades de siembra y tres volúmenes de sustrato, en chile dulce “Dulcítico”, bajo invernadero, Alajuela, Costa Rica, 2016.

10. Condiciones climáticas

Durante el ciclo del cultivo en el interior del invernadero se monitorearon variables climáticas de temperatura y radiación solar total. Los datos fueron almacenados en un registrador- programador de medición y control (Data logger) Campbell Scientific. (Mod. CR1000) y se presentan en las Figuras 2 y 3.

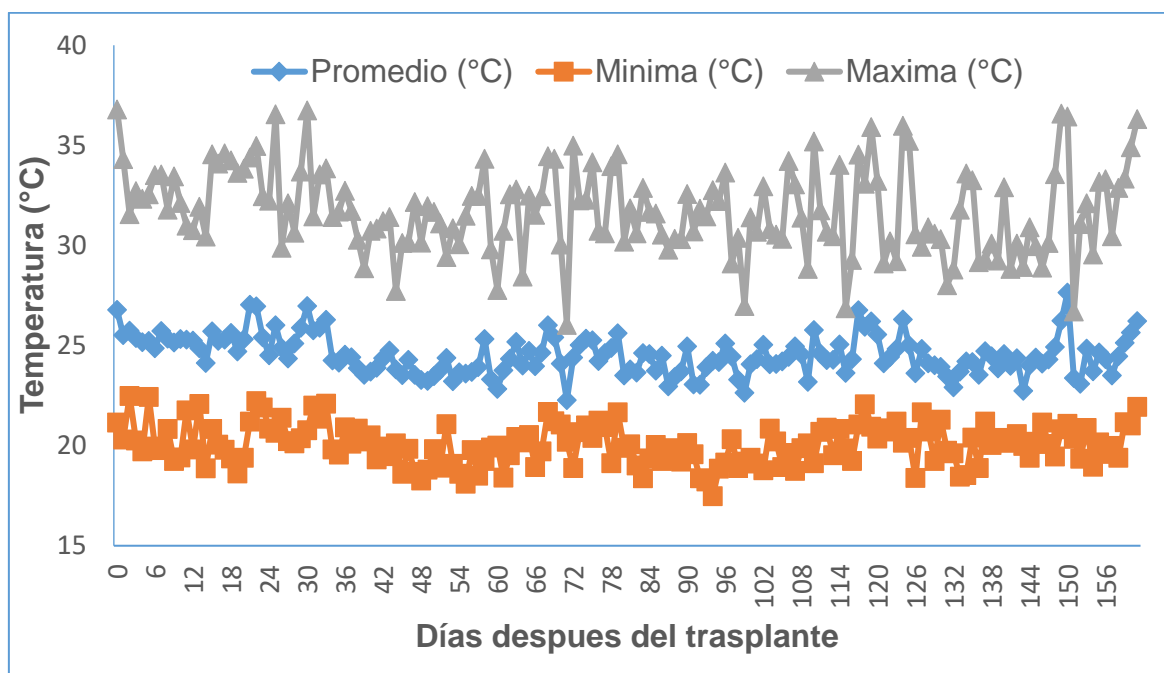


Figura 2. Valores promedio, mínimo y máximo de temperatura (°C) dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica.

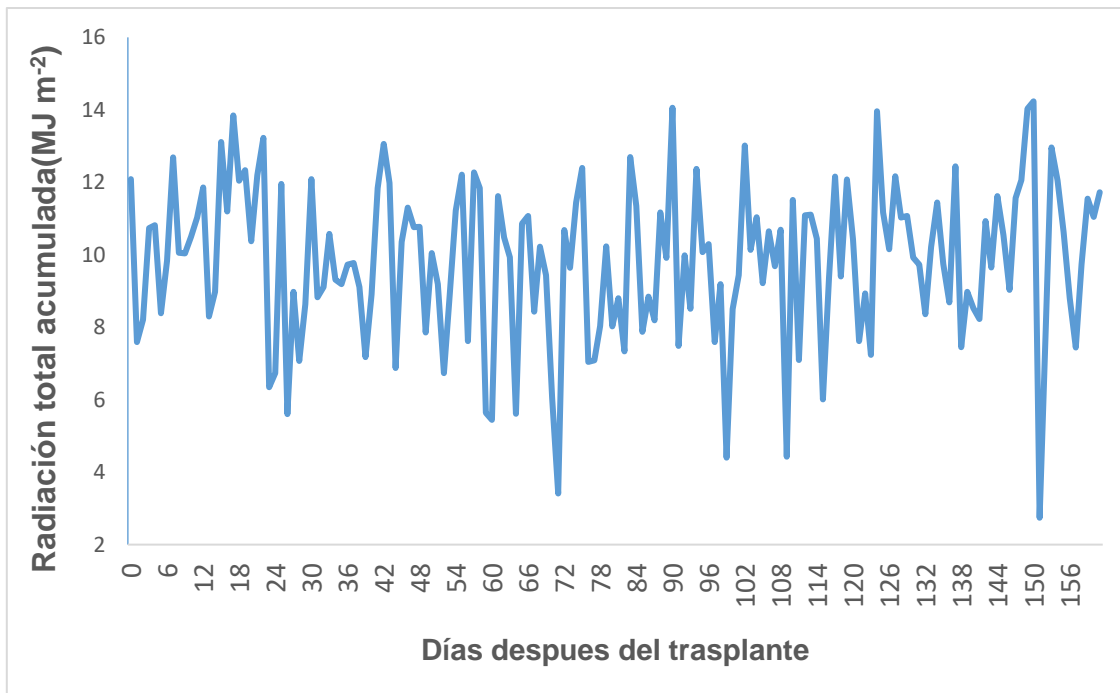


Figura 3. Radiación solar total (MJ m⁻²) dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica.

11. Variables de respuesta

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

Para cada tratamiento se determinó la ETc semanal (L m⁻²) utilizando la siguiente ecuación:

$$ETc = R \pm \Delta H_v - D$$

Donde:

- ΔH_v = es la diferencia entre los contenidos de humedad volumétrica del sustrato al inicio (H_{vi}) y al final (H_{vf}) de cada semana.
- R = volumen semanal de riego.
- D = volumen semanal de drenaje.

El volumen de agua de riego aportada se determinó mediante el caudal del gotero (L h⁻¹) y los minutos de riego controlados en el timer. La uniformidad del sistema de riego y el caudal se determinó periódicamente por el método del Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (1942) mencionado por Salcedo *et al.* (2005), obteniendo valores mayores a 94%.

El volumen de agua drenada y el contenido de humedad volumétrica del sustrato se midieron todos los días a las 6 a.m. antes del primer riego. Para esta determinación se colocaron 4 plantas sobre una bandeja de madera forrada con plástico negro y con una leve pendiente (1%) para que el agua drenara por una manguera colocada en un extremo de la bandeja y conectada a un recipiente de 12 L que estaba enterrado en el suelo (lisímetros de drenaje).

El volumen de este recipiente se debía trasvasar a una probeta de 1 litro para su medición (Figura 4 A). A estas bandejas se le colocó un forro de plástico negro-plata para evitar evaporación de agua desde la bandeja. Además se cubrió la superficie de las bolsas de manera que solo saliera el tallo de la planta y así evitar la evaporación del agua desde el sustrato (Figura 4 B).



Figura 4. Bandeja de recolección de drenaje (A) y cobertura de la bandeja para evitar la evaporación (B).

El contenido de humedad volumétrica en el sustrato se midió semanalmente a las 6 a.m. antes del primer riego con un sensor Time Domain Reflectometry (TDR, mod GS3) conectado a un registrador de datos (ProCheck Decagon Devices) (Figura 5). La medición se realizó en 3 puntos distintos a la altura media de cada una de las 4 bolsas que se colocaron sobre la bandeja de drenaje para un total de 12 mediciones por repetición.



Figura 5. Sensor TDR (Time Domain Reflectometry) conectado a consola GS3 Decagon Devices, para medir el contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Eficiencia física de uso del agua (EFUA)

Es la división, de la producción de fruta total (kg) entre la ET_c (m^3) para dar como resultado la EFUA ($kg\ m^{-3}$). Para determinar el rendimiento se cosecho una vez por semana las siete plantas de la parcela útil y se realizó su correspondiente clasificación de calidad en chile primera, segunda, tercera y desecho.

Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)

Es la división, de los ingresos de la producción comercial ($\text{C}\$$) entre la ET_c (m^3) para dar como resultado la EEUA ($\text{C}\$ m^{-3}$). Para determinar el ingreso se consultó

el precio por cada calidad del chile dulce en el Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos (CENADA) en el periodo evaluado.

12. Análisis estadístico

Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad utilizando el programa estadístico InfoStat. Si se cumplían dichos supuestos, se realizó un análisis de variancia (ANDEVA) para determinar si hubo efecto de la interacción entre la densidad y el volumen, o si hubo efecto independiente de ambos factores.

En caso de determinar efectos estadísticamente significativos ($P < 0,05$), se realizó una prueba de comparación de medias según prueba de Rienzo, Guzmán y Casancoves (DGC) ($P < 0,05$). Como no hubo efecto de la interacción ($P > 0,05$), se analizó el efecto principal del factor que fue estadísticamente significativo ($P < 0,05$).

Para el análisis de la información se utilizó un modelo de análisis de varianza para bloques completos al azar Rienzo *et al.* (2013) según el siguiente modelo estadístico (Cuadro 4).

$$y_{ijk} = \mu + U_i + S_j + (U \times S)_{ij} + B_k + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde:

y = variable de respuesta.

μ = media general.

U = efecto i ésimo de la densidad en los tratamientos.

S = efecto j ésimo del nivel de volumen en los tratamientos.

$U \times S$ = efecto ij ésimo de la interacción entre densidad y volumen.

B_k = efecto del k -ésimo bloque ($B = \gamma$)

ε = término de error, donde $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Cuadro 4. Formato de análisis de la variancia (ANDEVA) para factorial 2 x 3.

Fuente Variación	Grados libertad
Bloque o Repeticiones	2
Densidad (D)	1
Volumen (V)	2
D x V	2
Error	10
Total	17

Resultados

Evapotranspiración del chile dulce (ETc)

Al final del ciclo del cultivo de chile dulce, para la ETc total, no hubo efecto ($P > 0,05$) de la interacción densidad de siembra y volumen de sustrato; mientras que hubo efecto independiente ($P < 0,05$) de ambos factores. Al aumentar la densidad de siembra y el volumen de sustrato los valores de ETc incrementaron.

Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del chile dulce

El consumo de agua fue más alto en el cultivo de mayor densidad, donde la ETc aumentó un 40,4% al pasar de una densidad de 1,4 plantas m^{-2} a 2,4 plantas m^{-2} (Figura 6).

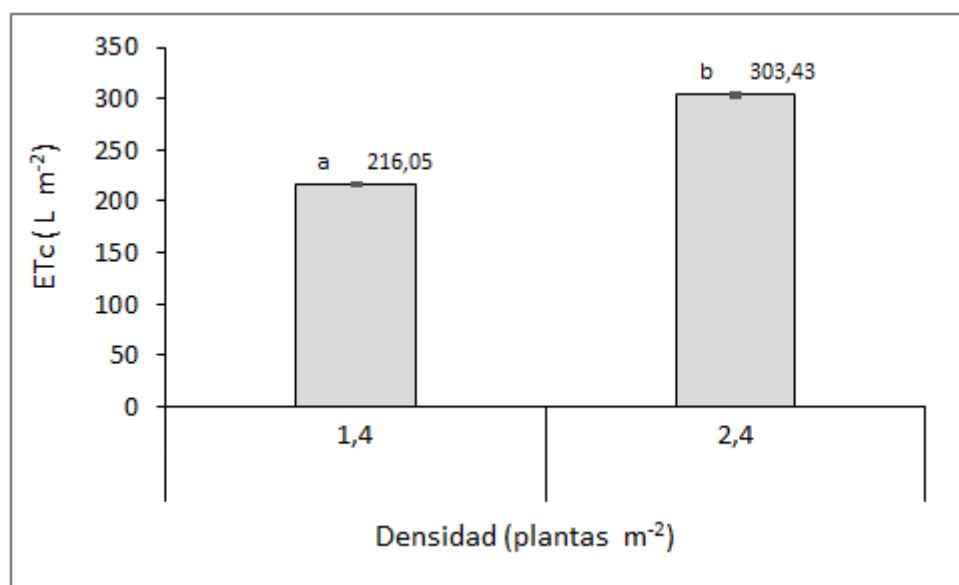


Figura 6. Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del cultivo (ETc, L m^{-2}) de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del chile dulce.

El consumo hídrico mostró un comportamiento creciente conforme incrementó el volumen de sustrato. La ETc en el cultivo con volumen de 21 L planta⁻¹ fue estadísticamente diferente ($P < 0,05$), con respecto a los demás volúmenes, la cual aumentó en un 11,7% al pasar de un volumen de 7 a 21 L planta⁻¹ (Figura 7).

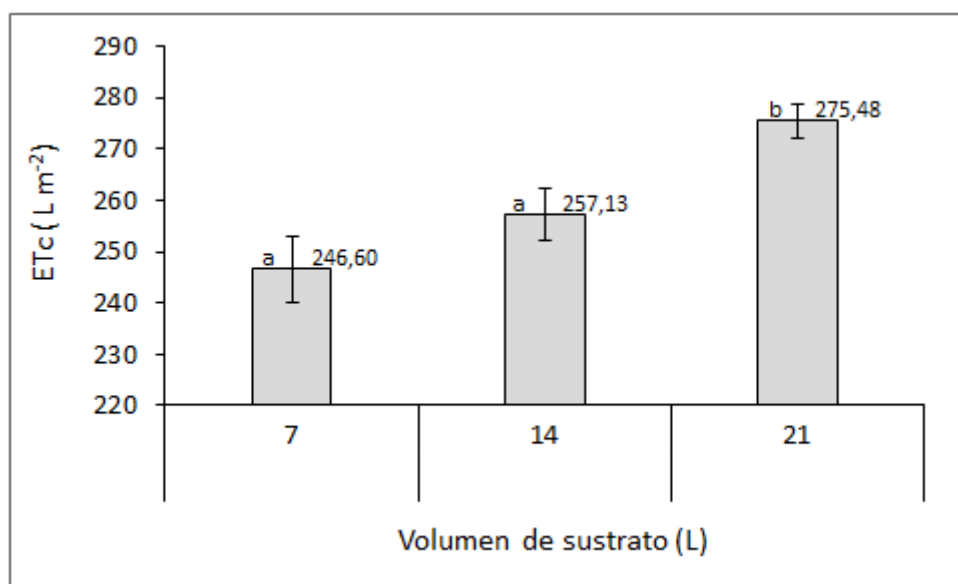


Figura 7. Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del cultivo (ETc, L m⁻²) de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Eficiencia física de uso del agua (EFUA)

La EFUA presentó efectos independientes ($P < 0,05$) de los factores densidad de siembra y volumen de sustrato. Con respecto a la interacción densidad de siembra y volumen de sustrato, no hubo efectos significativos ($P > 0,05$). La EFUA incrementó al disminuir la densidad de siembra y el volumen de sustrato.

Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce

La mejor EFUA se presentó en los cultivos de menor densidad disminuyendo un 12,4% al pasar de una densidad de 1,4 plantas m^{-2} a 2,4 plantas m^{-2} (Figura 8).

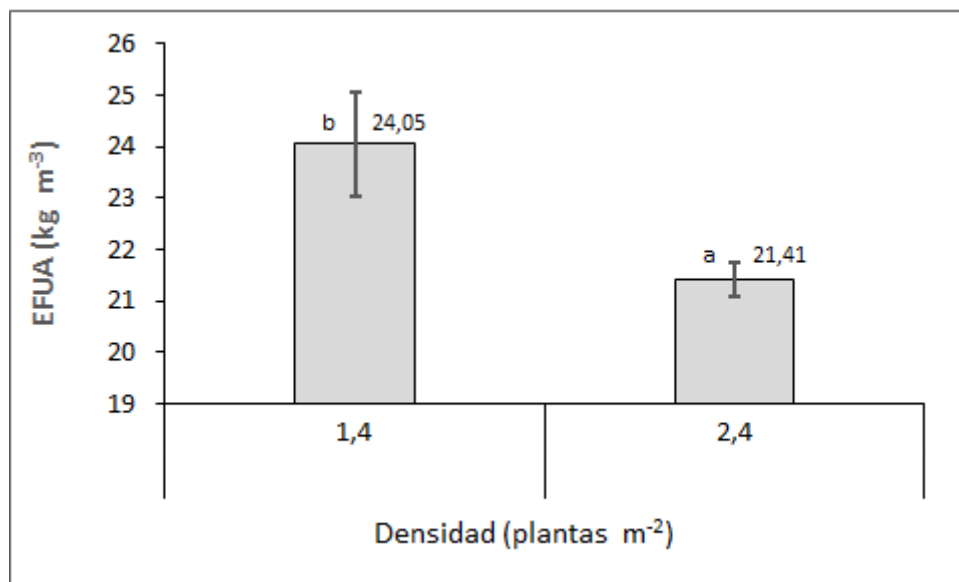


Figura 8. Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua (EFUA, $kg\ m^{-3}$) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce

La EFUA incrementó conforme disminuyó el volumen de sustrato por planta, donde el volumen de 21 $L\ planta^{-1}$ fue estadísticamente menor ($P < 0,05$) a los cultivos en menor volumen. La EFUA incrementó un 13,7% al pasar de un volumen de 21 a 7 $L\ planta^{-1}$ (Figura 9).

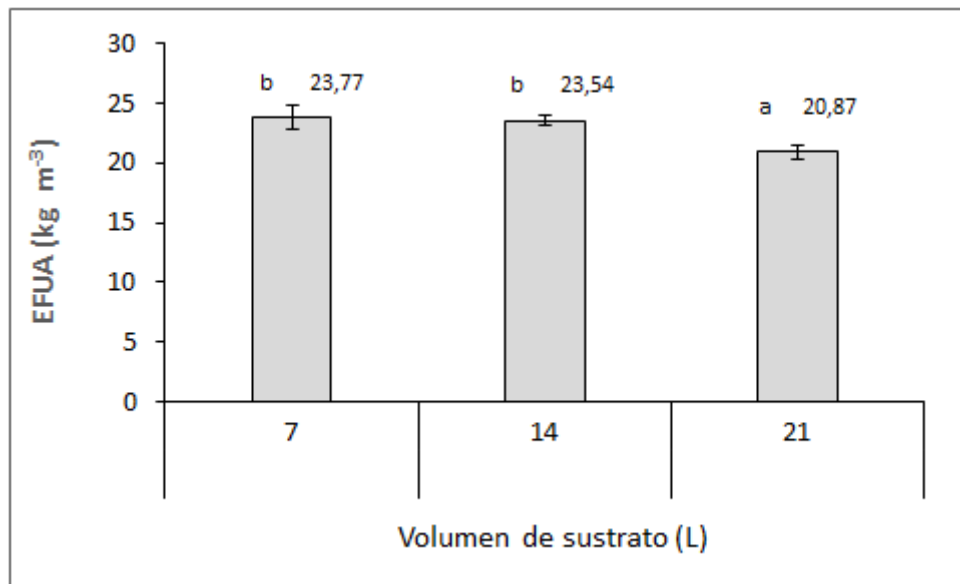


Figura 9. Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua (EFUA, kg m⁻³) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).

Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)

Al igual que para el caso de la eficiencia física, la EEUA presentó efectos independientes (P<0,05) de los factores densidad de siembra y volumen de sustrato. Con respecto a la interacción densidad de siembra y volumen de sustrato, no hubo efectos significativos (P> 0,05). La EEUA incrementó al disminuir la densidad de siembra y el volumen de sustrato.

Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia económica de uso del agua del chile dulce

La mejor EEUA se presentó en los cultivos de menor densidad aumentando un 13,05% al pasar de una densidad de 2,4 plantas m⁻² a 1,4 plantas m⁻² (Figura 10).

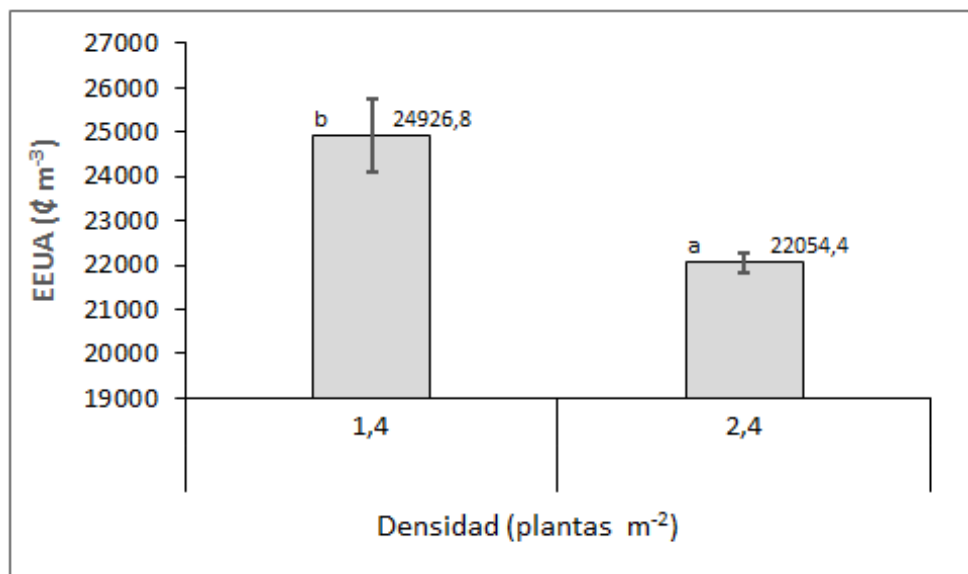


Figura 10. Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia económica de uso del agua (EEUA, ¢ m⁻³) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”; Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).

Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia económica de uso del agua del chile dulce

La EEUA incrementó conforme disminuyó el volumen de sustrato por planta, donde el volumen de 21 L planta⁻¹ fue estadísticamente menor (P<0,05) comparado con los cultivos con menor volumen. La EEUA incrementó en un 11,2% al pasar de un volumen de 21 a 7 L y en un 12,35% al pasar de un volumen de 21 a 14 L. (Figura 11)

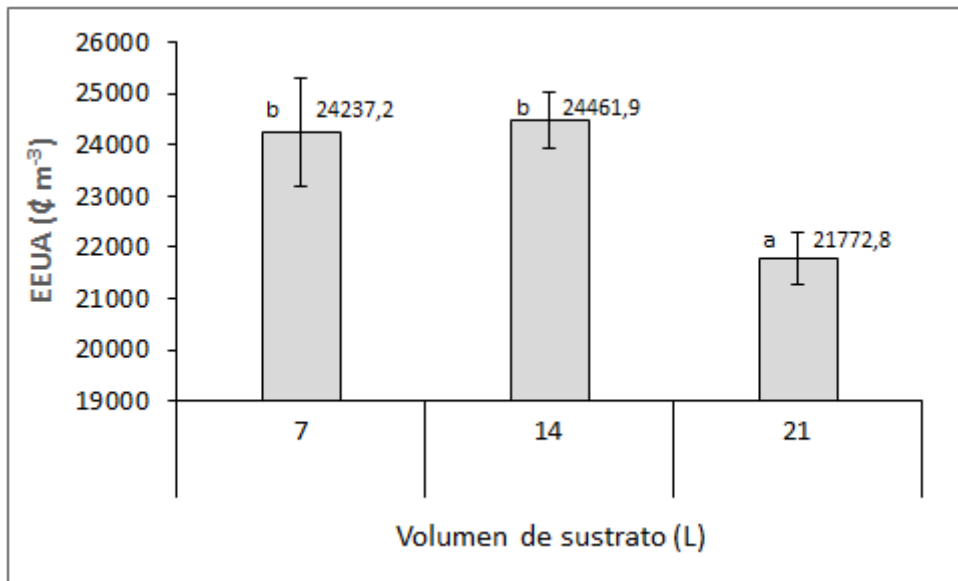


Figura 11. Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia económica de uso del agua (EEUA, ¢ m⁻³) en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).

Discusión

Efecto de la densidad de siembra sobre la evapotranspiración del chile dulce.

Estudios realizados en diferentes cultivos han demostrado que la ETc incrementa conforme aumenta la densidad de siembra. Huber *et al.* (1998) determinaron el efecto de tres densidades de *Eucalyptus nitens*: 1560, 850 y 663 árboles ha⁻¹ y las ETc obtenidas fueron: 861, 836 y 776 L m⁻² respectivamente. En el cultivo de olivo la demanda de agua por año para una densidad de 100 olivos ha⁻¹ es de 700 m³ ha⁻¹, mientras para 300 olivos ha⁻¹ es de 4200 m³ ha⁻¹ (Pastor y Hidalgo, 2002). Dichos resultados demuestran que existe una relación inversa entre el agotamiento de agua del suelo y la densidad de plantas ya que entre más densa la plantación, mayor será el índice de área foliar (IAF) y por ende mayores son las pérdidas de agua por transpiración ya que hay mayor interceptación de luz (Huber *et al.* (1998), Pastor y Hidalgo, 2002).

Los resultados del presente estudio coinciden con el comportamiento de la ETc reportado por los anteriores autores, ya que la densidad de 2,4 plantas m⁻² obtuvo una ETc total de 303,43 L m⁻² mientras que en 1,4 plantas m⁻² se obtuvo 216,05 L m⁻². En el presente estudio como en la mayoría de sistemas hidropónicos, la evaporación del agua es mínima, ya que el sustrato está protegido dentro de un contenedor cubierto de plástico y por tanto la superficie húmeda y expuesta del sustrato sujeta a evaporación, es prácticamente nula (Allen *et al.* 2006); de esta forma, el efecto del componente transpiración fue mayor que el componente evaporación en el cultivo de mayor densidad debido a un posible mayor índice de área foliar que interceptó mayor radiación y por ende sus mayores pérdidas de agua.

Los rangos de ETc según efecto de la densidad de siembra de chile dulce, obtenidos el presente estudio se encuentran dentro de los rangos reportados por diferentes autores, dependiendo este valor del ciclo de cultivo, genotipos, manejo y condiciones climáticas de cada región. En España, estudios realizados por Fernández *et al.* (2015) en chile dulce bajo diferentes tratamientos de riego en diferentes años, se obtuvieron valores de ETc entre 137 y 362 L m⁻² y de 160 a 346 L m⁻². Por otra parte, Karam *et al.* (2009), al aplicar tratamientos de riego en

el cultivo de chile Bell pepper (112 días de ciclo) determinaron rangos de ETc entre 275 y 478 L m⁻². Cabrera (2009) trabajando con chile dulce sembrado en fibra de coco, en un ciclo 217 días, a una densidad de 3 plantas m⁻², no encontró diferencias en la ETc de 3 variedades de chile dulce, Taranto, Zidenka y Sympathy, con 300, 255 y 270 L m⁻² respectivamente. Finalmente, Moreno *et al.* (2003) para un ciclo de 24 semanas de chile dulce, determinó una ETc de 523,4 L m⁻².

Efecto del volumen de sustrato sobre la evapotranspiración del chile dulce.

Los valores obtenidos de ETc para los volúmenes de 7, 14 y 21 L planta⁻¹ fueron 246,5, 257,13 y 275,48 L m⁻², respectivamente. La ETc obtenida con el volumen de 21 L planta⁻¹ fue estadísticamente superior a las demás. Estos valores se encuentran dentro de los rangos mencionados por Fernández *et al.* (2015), Karam *et al.* (2009) y Cabrera (2009). Con respecto a los factores sobre la ETc, fue mayor el efecto debido a la densidad de siembra que al volumen de sustrato, ya que la diferencia entre los valores mínimos y máximos obtenidos en cada caso fueron 87,38 y 28,85 L m⁻², respectivamente. Como se mencionó anteriormente esto se debe a que el componente transpiración de la variable ETc tuvo un mayor efecto que el componente evaporación del agua del sustrato.

En la literatura no se reportan estudios acerca del efecto del volumen de sustrato sobre la ETc del cultivo de chile dulce. Xu y Kafkafi (2001) probaron 9, 18 y 33 litros por planta en chile dulce y aunque no obtuvieron datos de ETc, resultó que al pasar de 9 a 33 L planta⁻¹, aumentó la absorción de nutrientes y el rendimiento total. Segal *et al.* (2006) menciona que la biomasa seca total y el rendimiento de los cultivos es directamente proporcional a la transpiración. Azofeifa y Moreira (1988), Achhireddy *et al.* (1982) y Hall (1977) citados por Campos (2016) mencionan que el fruto es el principal sumidero de fotoasimilados y que durante la etapa de llenado de fruta más del 80% del incremento diario en peso seco de la planta se deposita en los frutos y que el crecimiento de otros órganos se reduce. Por otra parte, Karam *et al.* (2009) mencionan que la etapa de inicio de fructificación al llenado de frutos (60 a 130 días después del trasplante) es donde se presenta el mayor requerimiento de ETc en chile dulce. Con lo presentado

anteriormente por los autores surge la hipótesis de que a mayor volumen de sustrato, mayor será el rendimiento y por ende una mayor ETc. Pero para las condiciones climáticas del invernadero en el presente estudio, los rendimientos totales obtenidos para 7, 14 y 21 L planta⁻¹ fueron 5,78, 6,02 y 5,67 kg m⁻² (Anexo 13), respectivamente y sin diferencias significativas entre estos, por lo que el mayor consumo de agua para el volumen mayor no se debe a un mayor rendimiento y se descarta esta hipótesis.

La ETc está conformado en parte por dos factores: la medida en que la cubierta vegetal crece y la variación en la cobertura de la superficie del suelo (en este caso sustrato). Cuando la proporción de superficie de suelo es alta hay una alta contribución para que este valor de ETc aumente principalmente en las primeras etapas del cultivo cuando los niveles de área foliar son bajos y el sombreado del suelo es escaso (Santos *et al.* 2010). Después de un riego el efecto de la evaporación de la superficie de suelo bajo el follaje es predominante por efecto de la radiación, temperatura y viento (Allen *et al.* 2006). Si bien se mencionó anteriormente que el componente evaporación tuvo un efecto menor que el componente transpiración cuando se analizó el factor densidad, ahora analizando el factor volumen, la evaporación del agua en el sustrato pudo haber aumentado al incrementarse la superficie expuesta a la radiación y temperatura durante el día, debido a un contenedor más grande de sustrato. Este posible efecto de mayor evaporación en 21 L planta⁻¹ pudo haber aportado a una mayor ETc a pesar de las precauciones tomadas para evitar evaporación.

En los anexos 2 y 3 se observa que los tratamientos con un volumen de 21 L planta⁻¹ recibieron al final del ciclo, un mayor volumen total de agua en el riego y drenaje. En el anexo 4 se observa que el manejo del porcentaje de humedad volumétrica en el sustrato fue muy uniforme para todos los tratamientos por lo que se puede asegurar que ningún tratamiento estuvo sometido a estrés hídrico. Pero en el anexo 5 se observa cuánto fue el volumen de agua que tuvo disponible la planta en cada tratamiento y se observa que los volúmenes de 21 L planta⁻¹ fueron superiores. Fernández *et al.* (2015), Karam *et al.* (2009), Dagdelen *et al.* (2004) trabajando en el cultivo de chile dulce y Wang *et al.* (2011) en tomate, han demostrado que al aumentar el volumen de agua disponible para la planta provoca un aumento la ETc y una disminución de la eficiencia de uso del agua.

Karam *et al.* (2009) en el cultivo de chile tipo bell pepper, demostraron que al aumentar el volumen de agua disponible en el sustrato para las plantas, estas fueron más eficientes en el uso de la radiación. Moreno *et al.* (2010) demostraron en el cultivo de pepino, que el índice de área foliar y el volumen de raíces es mayor al aumentar el volumen del contenedor de las plantas; este autor y Xu y Kafkafi (2001) afirman que el crecimiento y desarrollo limitado de la raíz cambia la estructura de la parte aérea de la planta, ya que el volumen donde se encuentra la raíz está relacionado con la disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes. Basándose esta información se puede deducir que el volumen de 21 L planta⁻¹ obtuvo una ETc más elevada por tener una mayor disponibilidad de agua en sus plantas, un posible mayor índice de área foliar, una mayor eficiencia de uso de la radiación que se traduce en una mayor transpiración. Sumado a esto, el efecto que se mencionó anteriormente, la posible mayor evaporación del agua en el sustrato al tener una mayor superficie húmeda expuesta.

Eficiencia física de uso del agua (EFUA)

La EFUA del chile dulce “Dulcítico” no fue afectada por la interacción entre densidad de siembra y volumen de sustrato. Ambos factores, por separado si afectaron de forma significativa el valor de la EFUA. En el presente estudio, la EFUA incrementó conforme disminuyó la densidad de siembra y el volumen de sustrato. La EFUA al ser el cociente de la producción comercial (kg m⁻²) entre la ETc (m⁻³), al mantener rendimientos similares entre tratamientos pero menores valores de ETc en la densidad baja y los volúmenes bajos, la EFUA consecuentemente incrementa.

Con respecto al rendimiento comercial, solo hubo efecto estadísticamente significativo en el factor densidad de siembra, donde se obtuvieron valores de 5,18 y 6,47 kg m⁻² (Anexo 12) para 1,4 y 2,4 plantas m⁻². No así para el factor volumen de sustrato o la interacción de factores.

Efecto de la densidad de siembra sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce.

Los valores de EFUA obtenidos en el presente estudio fueron 24,05 y 21,41 kg m⁻³ para 1,4 y 2,4 plantas m⁻² respectivamente. Estos valores se encuentran

dentro del rango de EFUA encontrados por autores, por ejemplo, Fernández *et al.* (2015) para los años 1997 y 1998, trabajando en el cultivo de chile dulce, de un ciclo de 270 días, obtuvieron valores de EFUA de 30,6 y 32,5 kg m⁻³ respectivamente; Fernández *et al.* (2012) señalaron que la EFUA del pimiento en un ciclo de otoño a invierno fue de 21 kg m⁻³ mientras que de otoño a primavera fue de 16,9 kg m⁻³. Castillo (2015) para el cultivo de chile dulce; determinó la EFUA de 5 tratamientos de riego (40, 60, 80, 100 y 120 % de la demanda hídrica del cultivo) y fueron 19, 13, 11, 9 y 7,26 kg m⁻³ respectivamente. Cabrera (2009) obtuvo valores de EFUA de 23,3, 13,7 y 11,1 kg m⁻³ para las variedades de chile, Taranto, Zidenka y Sympathy, siendo respectivamente.

Diferentes estudios realizados en diferentes cultivos en los que se ha evaluado el efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento, se han demostrado que existe una relación lineal entre el aumento de la densidad de siembra y el rendimiento por unidad de área. Zuñiga *et al.* (2004) evaluaron tres densidades de siembra en pimiento (12, 16 y 24 plantas m⁻²) y los resultados de tres variables analizadas fueron: la tasa de crecimiento (cm día⁻¹) 0,36, 0,32 y 0,46, la altura de la planta (cm) 76,2, 78,4 y 82,7 y rendimiento (kg m⁻²) 34,2, 36,1 y 39,8 para esas densidades respectivamente. Campos (2016) probó dos densidades de siembra 5,3 y 2,8 plantas.m⁻² y evaluó el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo y los rendimientos obtenidos fueron 4,26 y 2,25 kg m⁻² respectivamente. Hosein *et al.* (2012) probaron en chile, el efecto de cuatro densidades de siembra: 10, 6,6, 5 y 3,3 plantas m⁻² y los rendimientos respectivamente de estas densidades fueron 12,9, 9,4, 9,3, y 4,9 kg m⁻². Law y Egharevba (2009) citados por Hosein *et al.* (2012) mencionan que las plantas a baja densidad son más vigorosas que a alta densidad pero que eso no compensa la producción mayor por área que da el sembrar más plantas m⁻². Este comportamiento se cumplió en el presente estudio ya que la densidad de 2,4 plantas m⁻² obtuvo un rendimiento superior (6,47 kg m⁻²) a 1,4 plantas m⁻² (5,18 kg m⁻²) pero la ETc de 2,4 plantas m⁻² (303,43 L m⁻²) fue muy superior a la obtenida en 1,4 plantas m⁻² (216, 05 L m⁻²). Es por esto que la EFUA obtenida en la densidad alta fue inferior.

Efecto del volumen de sustrato sobre la eficiencia física de uso del agua del chile dulce.

Los valores obtenidos de EFUA para los volúmenes de sustrato de 7, 14 y 21 litros por planta fueron 23,77, 23,54 y 20,87 kg m⁻³, respectivamente. Siendo significativamente menor solamente el volumen de 21 litros por planta. Estos datos se encuentran dentro de los rangos mencionados por Fernández *et al.* (2015), Fernández *et al.* (2012), Castillo (2015) y Cabrera (2009).

Xu y Kafkafi (2001) probaron en chile dulce, tres volúmenes de sustrato (9, 18 y 33 l pl⁻¹) y 3 niveles de NPK y resultó que las plantas en volúmenes de sustrato bajos fueron más eficientes en el uso del agua y los nutrientes. Este efecto se obtuvo en este estudio ya que la EFUA en los volúmenes de 7 y 14 litros fue superior al de 21 litros. Este valor más bajo de EFUA de 21 litros es efecto del valor obtenido de ETc mayor en comparación con 7 y 14 litros ya que este es el denominador en el cociente de la ETc. También se puede sumar un posible efecto como el encontrado por Moreno *et al.* (2010) en el cultivo de pepino, quien comparó cuatro tratamientos de volumen de sustrato por planta y obtuvo valores más elevados de área foliar, diámetro del tallo, peso seco del follaje, largo de la raíz, volumen de raíz y peso seco de la raíz en las plantas sembradas en volúmenes mayores; este autor menciona que esto se debe a que la raíz creció con menos limitaciones de oxígeno, agua y nutrientes al utilizarse un contenedor más amplio. Lo anterior no se puede afirmar ya que ninguna de las variables anteriores fue evaluada durante el estudio.

Eficiencia económica de uso del agua (EEUA)

La EEUA del chile dulce “Dulcítico” no fue afectada por la interacción entre densidad de siembra y volumen de sustrato. Ambos factores, por separado si afectaron de forma significativa el valor de la EEUA. En el presente estudio, la EEUA incrementó conforme disminuyó la densidad de siembra y el volumen de sustrato. Cabe destacar que la EEUA al ser el cociente del valor económico de la producción comercial (€) entre la ETc (m⁻³), el componente rendimiento comercial (kg m⁻²) afecta el dato por lo que el comportamiento de la EEUA es igual a la EFUA en ambos factores evaluados.

Efecto de la densidad de siembra sobre la EEUA del chile dulce.

Los valores obtenidos de EEUA para 1,4 y 2,4 plantas m^{-2} fueron 24.926,8 y 22.054,4 € m^{-3} respectivamente. El precio del chile dulce, el rendimiento del cultivo y un bajo consumo de agua por el cultivo (ETc) explica los valores altos de EEUA (Gallardo, 2007). Por ejemplo en Almería los cultivos hortícolas en invernadero alcanzan eficiencias económicas de uso del agua de 13,5 € m^{-3} mientras que en campo abierto 1,6 € m^{-3} (Gallardo, 2007). Otro comparativo que hace este autor es la eficiencia económica de uso del agua de cultivos extensivos como el maíz con 0,14 € m^{-3} contra hortícolas a campo abierto 1,6 € m^{-3} y también contra cultivos en invernadero muy rentables como fresa con 3,5 € m^{-3} .

Los valores obtenidos en el presente estudio no se pueden comparar con valores de literatura ya que el precio del chile varía en cada lugar y época según su clasificación de calidad. En este mismo estudio, pero evaluando el rendimiento, Fallas (2017) determinó que el rendimiento, se redujo significativamente ($P < 0,05$) al pasar de una densidad de 2,4 plantas m^{-2} a 1,4 plantas m^{-2} , en un 11% para las categorías de primera y segunda y un 22% para la categoría de tercera. Para el factor densidad de siembra el rendimiento comercial fue mayor en 2,4 planta m^{-2} por lo que se esperaría que tenga la mayor EEUA, pero no fue así, ya que esta densidad tuvo un mayor consumo de agua lo cual provoca una menor EEUA en comparación con la densidad de 1,4 plantas m^{-2} .

Efecto del volumen de sustrato sobre la EEUA del chile dulce.

Los valores obtenidos de EEUA para 7, 14 y 21 litros por planta fueron 24.237,2, 24.461,9 y 21.772, 8 € m^{-3} respectivamente, siendo, 7 y 14 litros mayores significativamente a 21 litros. Los mismos 3 componentes descritos por Gallardo (2007) anteriormente aplican en este caso. Para el factor volumen de sustrato las plantas sembradas en 21 litros obtuvieron valores más elevados de consumo de agua o ETc en comparación a 7 y 14 litros por lo que su valor de EEUA fue significativamente menor a estos dos últimos.

Conclusiones

- Los factores densidad de siembra y volumen de sustrato tuvieron efectos independientes sobre la ETc del chile dulce “Dulcítico”, obteniendo la densidad de siembra más alta y el volumen de sustrato mayor, los valores más elevados de ETc
- Los factores densidad de siembra y volumen de sustrato tuvieron efectos independientes sobre la EFUA del chile dulce “Dulcítico”, obteniendo la densidad de siembra más baja y el volumen de sustrato menor, los valores más elevados de EFUA.
- Los factores densidad de siembra y volumen de sustrato tuvieron efectos independientes sobre la EEUA del chile dulce “Dulcítico”, obteniendo la densidad de siembra más baja y los dos volúmenes de sustrato menores, los valores más elevados de EEUA.
- Los valores de EFUA y EEUA obtenidos en el chile dulce “Dulcítico”, se vieron más afectados por su componente ETc, que por el componente rendimiento comercial.

Recomendaciones

1. Agronómica:

- Para maximizar la economía en el uso del agua, se recomienda que el chile dulce “Dulcítico”, bajo invernadero se siembre a una densidad de 1,4 plantas m^{-2} y con un volumen de sustrato de 7 litros planta⁻¹. Sin embargo, si se desea obtener rendimientos más altos, se recomienda que se siembre a una densidad de 2,4 plantas m^{-2} y con un volumen de sustrato de 7 litros planta⁻¹.

2. Estudios similares:

- Evaluar un periodo superior a 18 semanas, ya que el comportamiento de las variables de respuesta estudiadas están en función de las condiciones climáticas y la edad del cultivo.
- Realizar un análisis de costo beneficio de cada tratamiento.
- Evaluar volúmenes de sustrato por planta menores a 14 litros.
- Determinar el peso seco y volumen de la raíz en el cultivo al final del ciclo.
- Determinar el peso seco de la parte aérea de la planta al final del ciclo.
- Medir en tiempo real, las concentraciones de oxígeno y temperatura en el sustrato.

Literatura consultada

- Alarcón, A. 1995. Fertirrigación del pimiento dulce en invernadero. Pimientos. Compendios de Horticultura. 8p.
- Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 1 ed. Roma. 323 p.
- Arévalo, G. 2015. Determinación de la eficiencia de manejo de nutrientes y agua en tres variedades de pimiento de color (*capsicum annum*) bajo hidroponía en condiciones de invernadero en Mulacagua, departamento de Comayagua, Honduras. Tesis. Ing. Agr. Universidad de Almería, España. 100 p.
- Arizaleta, M; Pire, R. 2008 RESPUESTA DE PLÁNTULAS DE CAFETO AL TAMAÑO DE LA BOLSA Y FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO Y FÓSFORO EN VIVERO. *Agrociencia* 42(1): 47-55.
- Bonachela, S; Orgaz, F; Thompson, R; Fereres, E. 2015. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *Horticultural Science and Biotechnology* 80(1):87-96.
- Cabrera, J. 2009. Evaluación del consumo de agua y nutrientes en chile (*Capsicum annum*), variedades Taranto, Zidenka y Sympathy en hidroponía y condiciones de altura en Mulacagua, Comayagua, Honduras. Tesis Lic. Ing Agr. Zamorano, Honduras. 31 p.
- Campos, L. 2016. CRECIMIENTO DE CHILE HABANERO (*Capsicum chinense* Jacq.) BAJO DIFERENTE ESPACIAMIENTO ENTRE HILERAS EN LA COMARCA LAGUNERA. Tesis. Maestro en Ciencias Agrarias. Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México. 55p.
- Castillo, F. 2015. "EFECTO DE VARIAS DOSIS DE RIEGO EN EL COMPORTAMIENTO AGRÓNOMICO DEL PIMIENTO (*Capsicum annum* L.), EN LA GRANJA EXPERIMENTAL MANGLARALTO, CANTÓN SANTA
- Cruz, N; Sánchez, F; Ortiz, J; Mendoza, C. 2009. ALTAS DENSIDADES CON DESPUNTE TEMPRANO EN RENDIMIENTO Y PERÍODO DE

COSECHA EN CHILE PIMIENTO. Agricultura Técnica en México 35(1): 73-80.

Dagdelen, N; Yilmaz, E; Sezgin, F; Gurbus, T. 2004. Effects of wáter stress at diferent growth stages on processing pepper (*Capsicum annum* Cv. Kapija) yield water use and quality characteristics. Pakistan Journal and Biological Sciences 7(12): 2167-2172.

Di Rienzo, J; Balzarini, M; Tablada, M; Gonzales, L; Bruno, C; Córdoba, M; Robledo, W; Casanoves, F. 2013. Estadística y Biometría. 1 ed. Argentina. 404 p.

Echandi, C. 2012. Híbridos promisorios de chile dulce para la zona media-alta de Costa Rica. Boletín Técnico Quincenal de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 7 p.

Elizondo, E; Monge, J. 2016. Caracterización morfológica de 12 genotipos de chile dulce (*Capsicum annum* L.) cultivados en invernadero en Costa Rica. Tecnología en Marcha 29(3): 60-72.

Estrada, F. 2013. INVENTARIO DE TECNOLOGÍAS “CHILE-REGIÓN CENTRAL OCCIDENTAL” MARCO DEL PROYECTO REGIONAL PRESICA”. San José, CR. 35 p.

Fallas, D. 2017. Efecto de la densidad de siembra y el volumen del sustrato sobre el rendimiento y la calidad poscosecha del chile dulce (*Capsicum annum* cv. Dulcítico”), bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica. Tesis Lic. Ing.Agr. San José, Costa Rica, Universidad d Costa Rica. 71 p.

Fernandez, M; Gallardo, M; Bonachela, S; Orgaz, F; Thompson, R; Fereres, E. 2015. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. Horticultural Science and Biotechnology 80(1):87-96.

Fernández, M; Thompson, R; Bonachela, S; Gallardo, M; Granados, M. 2012. Uso del agua de riego en los cultivos en invernadero. Cuaderno de estudios agroalimentarios. Almería, España. 24 p.

Gallardo, M; Fernandez, M; Thompson, R; Magan, J. 2007. Productividad del

agua en cultivos bajo invernadero en la costa mediterránea. *Vida Rural* 1 (259): 48-51.

- Hamid, M. 1985. Effect of plant density on tomato yield. Bangladesh. 3 p.
- Hossein, M; Aroie, H; Ameri, A; Fatemi, H. 2012. Effect of plant density and nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annum* L.). *African Journal of Agricultural Research* 7(6): 859-866.
- Huber, A; Barriga, P; Trecaman, R. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). *Bosque* 19(1): 61-69.
- Huber, A; Trecaman, R. 2004. Respuesta del balance hídrico al raleo de una plantación joven de *Pinus radiata* (D. Don) en el secano interior de Chile. *Terra Latinoamericana* 22(4): 417-424.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos Agropecuarios). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. San José, CR. 145 p.
- Jara, D. 2016. EVALUACION DE TRES HÍBRIDOS DE PIMIENTO (*Capsicum annum* L.) CULTIVADOS EN HIDROPONÍA CON TRES MEZCLAS DE SUSTRATO. Tesis Ing. Agr. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.
- Karam, F; Masaad, R; Bachour, R; Rhayem, C; Roupael, Y. 2009. Water and Radiation Use Efficiencies in Drip-irrigated Pepper (*Capsicum annum* L.): Response to Full and Deficit Irrigation Regimes. *Europ.J.Hortic.Sci* 74(2): 79-85.
- López, L. 2014. Actualidad de la agrocadena del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). Programa de Innovación y Transferencia de Tecnología de tomate (Pitta Tomate). San José, CR. 41 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2014. Memoria de gestión del sector agroalimentario. San José, CR. 164p.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Agrocadena regional del cultivo de chile dulce. Alajuela, CR. 22 p.

- Martínez, M. 2003. Estudio de Costos de Producción para el Cultivo de chile dulce (*Capsicum annum*) bajo invernadero en la localidad de Pejibaye. Tesis Bach. Ing. Agr. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 74 p.
- Moreno, M; Ribas, F; Moreno, A; Cabello, M. 2003. Physiological Response of Chile Pepper to Trickle Irrigation. Spanish Journal of Agricultural Research 1(2): 65-74.
- Montero, L; Duarte, C; Cun, R; Cabrera, J. 2010. Efectividad de biofertilizantes micorrízicos en el rendimiento del pimiento (*Capsicum annum* L. var. Verano 1) cultivado EN diferentes condiciones de humedad del sustrato. Cultrop 31(3):1-8.
- Moreno, E; Sánchez, F; Gonzales, L; Pérez, C; Magaña, N. 2010. Effects of Substrate Volume and Levels of N-P-K on the Growth Cucumber Seedlings. Terra Latinoamericana 29 (1): 57-63.
- Pastor, M; Hidalgo, J. 2002. Programación del riego en aguas subterráneas en el olivar de la provincia de Jaen. Madrid, España. 5 p.
- Peil, R; Galvez, J. 2004. Rendimiento de plantas de tomate injertadas y efecto de la densidad de tallos en el sistema hidropónico. Horticultural Brasileira 22(2): 265-270.
- Pérez, P; Castellví, F.2002. ANÁLISIS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN ESCALA LOCAL Y REGIONAL EN CATALUÑA. Ingeniería del agua 9(1): 59-72.
- PIMA (Programa Integral de Mercadeo Agropecuario, Costa Rica); CENADA (Centro Nacional de Abastecimiento y Distribución de Alimentos, Costa Rica). 2015. Boletín setiembre 2015 de volúmenes y precios de mayorista a minoristas San José, Costa Rica. 1 p
- Putra, A; Yuliando, H. 2015. Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: a Review. Agriculture and Agricultural Science Procedia 3 (1): 283-288.
- Quirós, M; Villalobos, N. 2014. Dulcítico, la nueva semilla de chile dulce. Información y comunicación. Hoja Informativa 19. Heredia, CR.

- Ramírez, R; Aguilar, J; Meza, L. 2018. ADAPTABILIDAD DE SEIS CULTIVARES DE CHILE DULCE BAJO INVERNADERO EN GUANACASTE. ALCANCES TECNOLÓGICOS. 12(1):13-23.
- Rojas, J; Paniagua, F. 2015. COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE *Capsicum annuum* L., *Lycopersicon esculentum* M. Y *Cucumis melo* L. BAJO CULTIVO PROTEGIDO HIDROPÓNICO UTILIZANDO LA SOLUCIÓN UNIVERSAL DE STEINER. Tesis Lic. Ing. Agr. Tecnológico de Costa Rica. San Carlos, CR. 98 p.
- Salcedo, F; Barrios, R; Garcia, M; Váldez, T. 2005. Distribution of the water for a microsprinkler system on an ultisol cultivated with Tahití Lime in the Monagas State, Venezuela. UDO Agrícola 5(1): 88-95.
- Salusso, F; Plevich, J; Sanchez, A; Grosso, L; Ramos, D. 2016. CALIDAD DE PLÁNTULAS DE LECHUGA EN DIFERENTES VOLÚMENES DE CELDAS Y SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO. Engenharia na agricultura, viçosa 25(6): 575-583.
- Santos, L; Valero, J; Piconell, M; Tarjuelo, J. 2010. El riego y sus tecnologías. CREA-UCLM. 1 ed. Albacete, España. EAL. 296 p.
- Segal, E; Ben-Gal, A; Shani, U. 2006. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency. Plant and soil 282(6): 333-341.
- Vence, K. 2008. DISPONIBILIDAD DE AGUA-AIRE EN SUSTRATOS PARA PLANTAS. Suelo 26(2): 105-114.
- Wang, Z; Liu, Z; Liu, X. 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20cm standard pan evaporation in Northeast China. Scientia Horticulturae 123(1):51-57.
- Wang, F; Kang, S; Du, T; Li, F; Qiu, R. 2011. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. Agricultural Water Management 98 (1): 1228-1238.
- WWAP (World Water Assessment Programme). 2018. The United World Water Development Report 2018. Nature-based solutions for water. UNESCO. Paris, Francia. 154 p.

- Xu, G; Kafkafi, U. 2001. Nutrient supply and container size effects on flowering, fruiting, assimilate allocation, and water relations of sweet pepper. Nanjing, China. *Acta Hortic.* 554(1):113-120.
- Zuñiga, L; Martínes, J; Baca, G; Martinez, Á; Tirado, J; Kohashi, J. 2004. Producción de chile pimiento en dos sistemas de riego bajo condiciones hidropónicas. *Agrociencia* 38 (2): 207-218.

Anexos

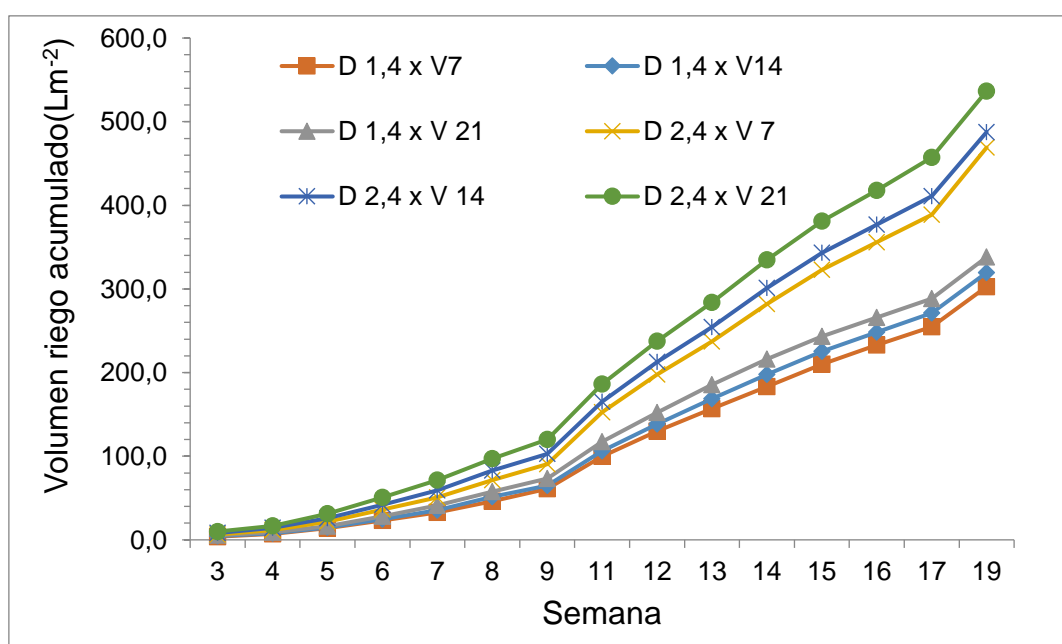
Anexo 1. Precios (¢) de moda semanal según categoría de fruto comercial de chile dulce.

Precio por categoría comercial (¢)			
Semana	Primera	Segunda	Tercera
1	20.000,00	¢ 18.000,00	¢ 14.000,00
2	20.000,00	¢ 18.000,00	¢ 15.000,00
3	16.000,00	¢ 15.000,00	¢ 12.000,00
4	20.000,00	¢ 18.000,00	¢ 13.000,00
5	16.000,00	¢ 15.000,00	¢ 12.000,00
6	22.000,00	¢ 20.000,00	¢ 15.000,00
7	16.000,00	¢ 13.000,00	¢ 10.000,00
8	16.000,00	¢ 12.000,00	¢ 10.000,00
9	11.000,00	¢ 9.000,00	¢ 7.000,00
10	11.000,00	¢ 8.000,00	¢ 4.000,00

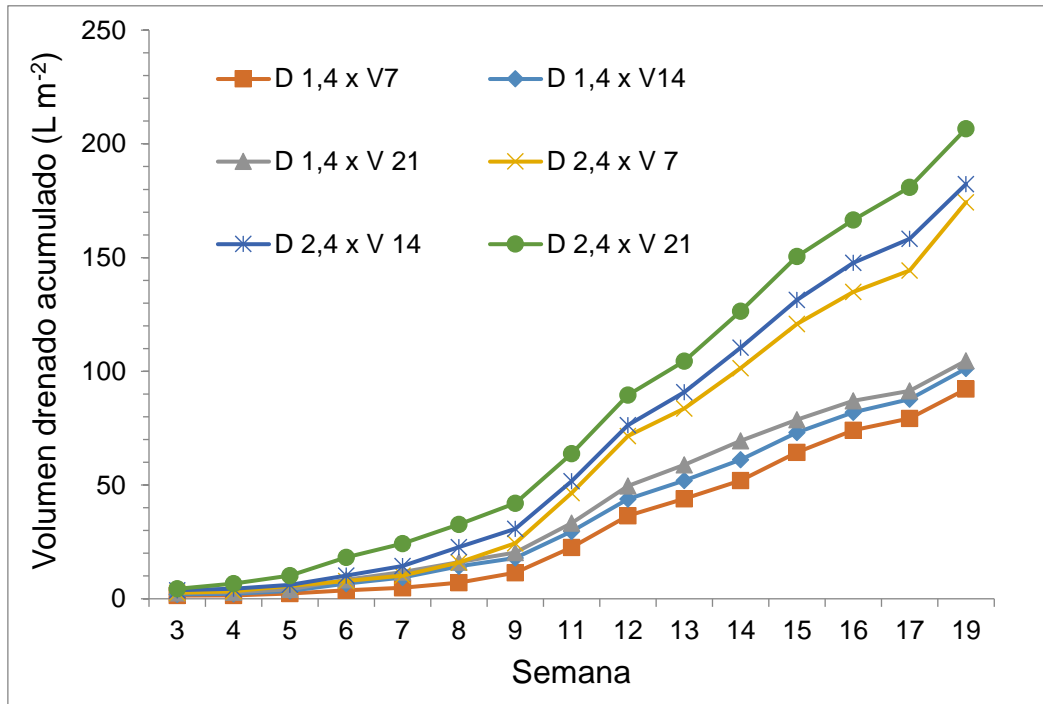
*Frutos promedio por caja/tina: 120 para frutos de primera, 210 para frutos de segunda y 300 para frutos de tercera.

**Tomado de PIMA, 2016.

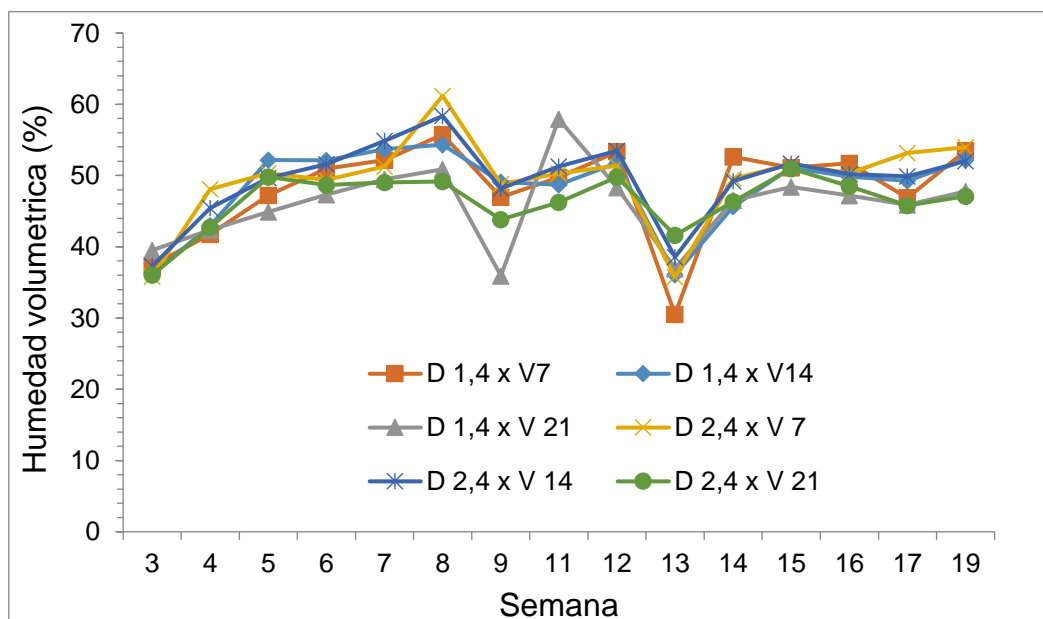
Anexo 2. Volumen de riego acumulado (L m⁻²) durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.



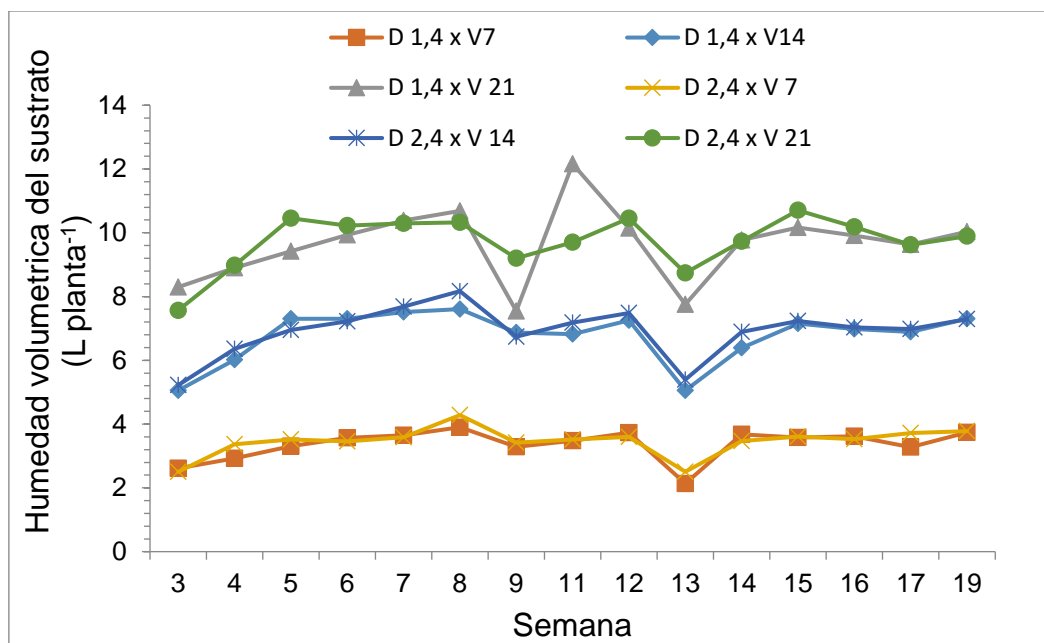
Anexo 3. Volumen de drenaje acumulado ($L m^{-2}$) durante todo el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.



Anexo 4. Contenido de humedad volumétrica (%) para cada tratamiento, durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica.



Anexo 5. Humedad volumétrica del sustrato por planta manejado durante todo el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico” para cada tratamiento en Alajuela, Costa Rica.



Anexo 6. Prueba de Levene para la variable evapotranspiración del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS_ETc (L m2)	18	0,41	0,16	53,34

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	113,4	5	22,68	1,66	0,2176
Tratamiento	113,4	5	22,68	1,66	0,2176
Error	163,57	12	13,63		
Total	276,97	17			

Anexo 7. Prueba de Levene para la variable eficiencia física de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS_EFUA (kg m3)	18	0,57	0,39	51,04

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6,93	5	1,39	3,21	0,0456
Tratamiento	6,93	5	1,39	3,21	0,0456
Error	5,19	12	0,43		
Total	12,12	17			

Anexo 8. Prueba de Levene para la variable eficiencia económica de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS_EEUA (? . m3)	18	0,62	0,46	50,36

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	7933357,67	5	1586671,53	3,85	0,0259
Tratamiento	7933357,67	5	1586671,53	3,85	0,0259
Error	4949042,38	12	412420,2		
Total	12882400,1	17			

Anexo 9. Análisis de la variancia para la variable evapotranspiración del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Análisis de la variancia					
ETc (l . m2)					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
ETc (l . m2)	18	0,97	0,95	4,08	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	37053,63	7	5293,38	47,2	<0,0001
Bloques	17,71	2	8,86	0,08	0,9246
Densidad (plantas . m-2)	34358,69	1	34358,69	306,37	<0,0001
Volumen (litros)	2563	2	1281,5	11,43	0,0026
Densidad (plantas . m-2)*V..	114,23	2	57,12	0,51	0,6157
Error	1121,49	10	112,15		
Total	38175,12	17			

Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=10,5830					
Error: 112,1487 gl: 10					
Densidad (plantas . m-2)	Medias	n	E.E.		
1,4	216,05	9	3,53	A	
2,4	303,43	9	3,53		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=13,7223					
Error: 112,1487 gl: 10					
Volumen (litros)	Medias	n	E.E.		
7	246,6	6	4,32	A	
14	257,13	6	4,32	A	
21	275,48	6	4,32		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

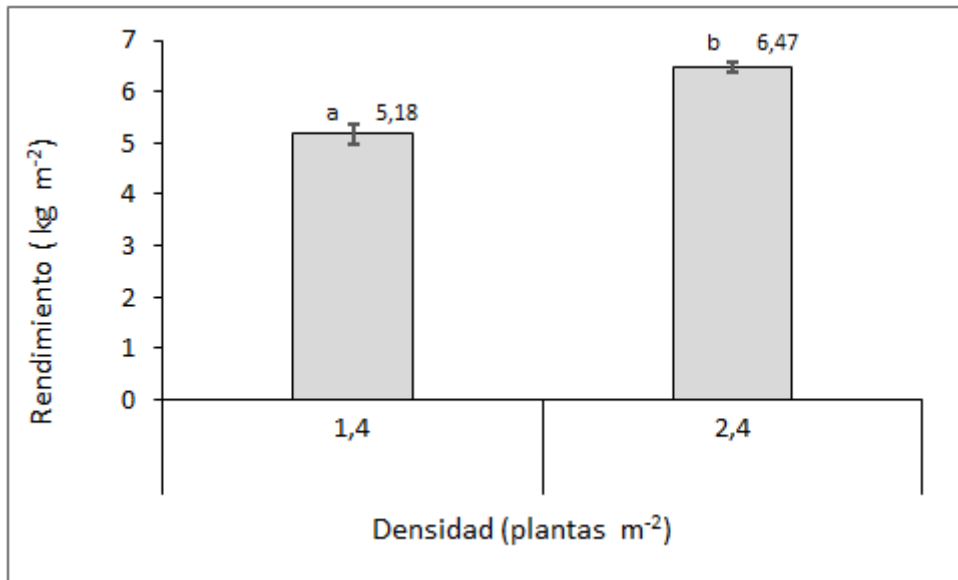
Anexo 10. Análisis de la variancia para la variable eficiencia física de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
LOG10_EPUA (kg . m3)	18	0,67	0,44	2,67	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,03	7	3,80E-03	2,87	0,0638
Bloques	1,10E-03	2	5,40E-04	0,41	0,6725
Densidad (plantas . m-2)	0,01	1	0,01	8,74	0,0144
Volumen (litros)	0,01	2	0,01	4,75	0,0356
Densidad (plantas . m-2)*V..	1,40E-03	2	6,80E-04	0,52	0,6089
Error	0,01	10	1,30E-03		
Total	0,04	17			
Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,0361					
Error: 0,0013 gl: 10					
Densidad (plantas . m-2)	Medias	n	E.E.		
2,4	1,33	9	0,01	A	
1,4	1,38	9	0,01		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,0468					
Error: 0,0013 gl: 10					
Volumen (litros)	Medias	n	E.E.		
21	1,32	6	0,01	A	
14	1,37	6	0,01		B
7	1,37	6	0,01		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

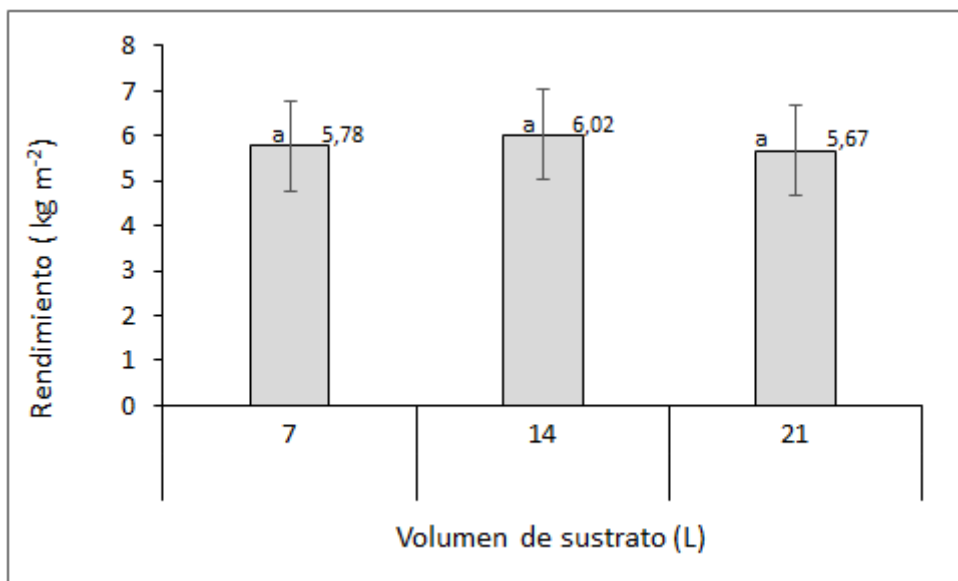
Anexo 11. Análisis de la variancia para la variable eficiencia económica de uso del agua del cultivo de chile dulce “Dulcítico” en Alajuela, Costa Rica.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
LOG10_EEUA (? . m3)	18	0,66	0,43	0,79	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,02	7	3,40E-03	2,83	0,0664
Bloques	9,20E-04	2	4,60E-04	0,39	0,6892
Densidad (plantas . m-2)	0,01	1	0,01	10,45	0,009
Volumen (litros)	0,01	2	4,80E-03	4,04	0,0516
Densidad (plantas . m-2)*V..	6,00E-04	2	3,00E-04	0,25	0,7822
Error	0,01	10	1,20E-03		
Total	0,04	17			
Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,0345					
Error: 0,0012 gl: 10					
Densidad (plantas . m-2)	Medias	n	E.E.		
2,4	4,34	9	0,01	A	
1,4	4,39	9	0,01		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:DGC Alfa=0,05 PCALT=0,0447					
Error: 0,0012 gl: 10					
Volumen (litros)	Medias	n	E.E.		
21	4,34	6	0,01	A	
7	4,38	6	0,01		B
14	4,39	6	0,01		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

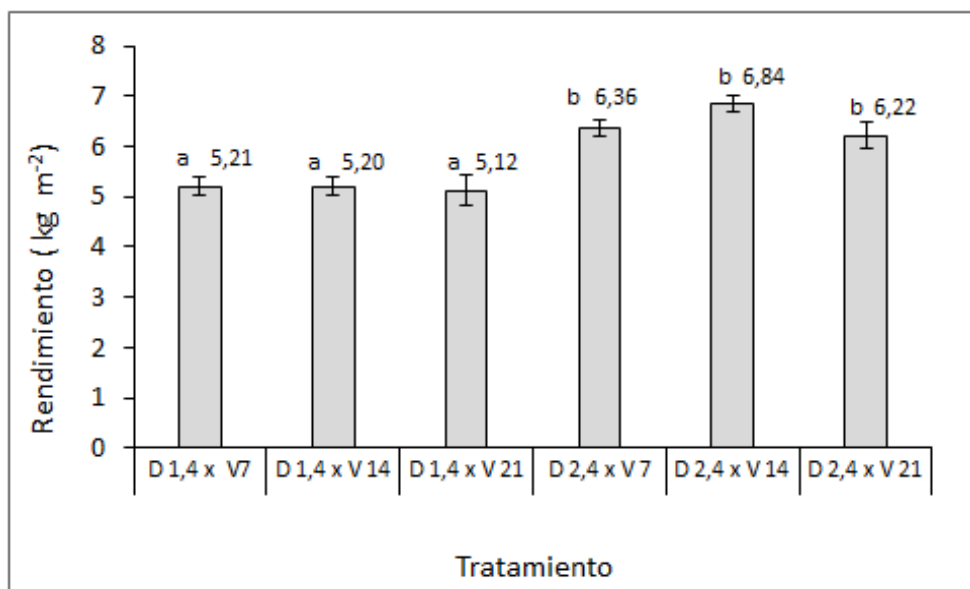
Anexo 12. Rendimiento comercial (kg m^{-2}) del factor densidad de siembra, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).



Anexo 13. Rendimiento comercial (kg m^{-2}) del factor volumen de sustrato, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).



Anexo 14. Rendimiento comercial (kg m⁻²) por tratamiento, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).



Anexo 15. Ingreso económico (¢ m⁻²) por tratamiento, en el cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica, 2016. Barras verticales indican el error estándar de la media y medias con letras distintas presentan diferencias estadísticamente significativas (P<0,05).

