

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
ESCUELA DE AGRONOMÍA



TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN  
MODALIDAD DE TESIS

Para Optar por el Grado Académico de Licenciatura

“Efecto del manejo del riego sobre la morfofisiología del cultivo de Tomate  
(*Solanum lycopersicum*) híbrido Gladiador en hidroponía bajo invernadero”.

DANIEL PACHECO ZAMORA

San Pedro, San José, Costa Rica

Diciembre, 2018

## Acta de aprobación

EFFECTO DEL MANEJO DEL RIEGO SOBRE LA MORFOFISIOLOGÍA DEL CULTIVO DE TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) HÍBRIDO GLADIADOR EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO

Daniel Pacheco Zamora

Tesis presentada a la Escuela de Agronomía como requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Agronomía

.....Director de Tesis

Freddy Soto Bravo. Dr.

..... Miembro del Tribunal

Marlon Retana Cordero Lic.

..... Miembro del Tribunal

Werner Rodríguez Montero Ph. D.

..... Miembro del Tribunal

Paula Calvo Brenes M.Sc.

..... Director de Escuela

Luis Gómez Alpízar Ph.D.

..... Sustentante

Daniel Pacheco Zamora

San José, 15 de diciembre de 2018

## **Dedicatoria**

La dedicatoria de este trabajo es para mi familia, que, durante toda mi vida, han estado ahí en los momentos buenos y malos, siempre tendiéndome su mano para apoyarme y ayudarme a crecer como persona y como profesional siempre empujándome a aspirar hasta las estrellas y así alcanzar mis sueños.

Especialmente quiero agradecer a mis padres María y Álvaro, que me han apoyado a lo largo de los años, a pesar de mis fracasos, decepciones y enredadas en el camino, gracias por todo, nunca podré terminar que agradecerles todo lo que me dieron.

## **Agradecimiento**

Deseo darle mi más sincero agradecimiento a las siguientes personas e instituciones quienes hicieron esto posible:

A mi director de tesis Freddy Soto por sus consejos y a mis revisores Marlon Retana por su apoyo en el trabajo dentro y fuera del invernadero, Paula Calvo y Werner Rodríguez que con sus observaciones me ayudaron a generar un mejor documento.

A nuestros asistentes Sharon, Carlos y Caletth que sin su ayuda no hubiésemos podido llevar adelante el trabajo día a día.

A María Isabel González Lutz, por su ayuda y guía en el análisis estadístico de los datos de esta tesis.

A Julio Vega y Andrés Oviedo, quienes más allá de ser funcionarios de la EEAFBM ayudaron siempre durante la tesis.

A FITTACORI ya que sin su aporte y apoyo económico este proyecto no se hubiera podido llevar a cabo.

A todos mis compañeros que estuvieron presentes en este proceso de aprendizaje.

## Índice general

<b>Acta de aprobación</b> .....	<b>II</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>III</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>IV</b>
<b>Índice general</b> .....	<b>V</b>
<b>Índice de Cuadros</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>X</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>0</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>Marco teórico</b> .....	<b>7</b>
Cultivo del Tomate .....	7
Material vegetal.....	8
Importancia de la morfofisiología .....	9
Tiempo térmico .....	10
Manejo del riego y la eficiencia en el uso de agua.....	12
Morfofisiología del cultivo en función del clima, el genotipo y el manejo agronómico .....	15
Cultivo sin suelo .....	19
Ambientes protegidos .....	20
<b>Objetivos</b> .....	<b>23</b>
Objetivo general .....	23
Objetivos específicos .....	23
<b>Metodología</b> .....	<b>24</b>
Ubicación del experimento.....	24

Material vegetal.....	26
Medio de cultivo .....	26
Descripción de los tratamientos .....	27
Sistema de riego .....	29
Cálculo de Grados Día.....	29
Manejo del cultivo .....	30
<b>Diseño experimental .....</b>	<b>32</b>
Variables de respuesta .....	32
Crecimiento del tallo principal.....	33
Longitud y ancho de la hoja .....	33
Diámetro basal del tallo .....	33
Número de hojas .....	33
Número de flores abiertas.....	34
Número de frutos cuajados.....	34
Índice de área foliar .....	34
Radiación fotosintéticamente activa interceptada.....	34
Rendimiento.....	34
<b>Análisis estadístico.....</b>	<b>35</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>36</b>
Ajustes cuadráticos de las variables .....	36
Variables de crecimiento.....	44
Precisión y exactitud de los métodos de control de riego .....	48
Número de flores abiertas.....	50
Índice de área foliar (IAF).....	53
Rendimiento .....	55

<b>Conclusiones.....</b>	<b>63</b>
<b>Literatura citada .....</b>	<b>64</b>

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. ....	26
<b>Cuadro 2.</b> Porcentaje de humedad volumétrica correspondiente para cada porcentaje de agotamiento de agua de riego según la curva realizada In situ en el invernadero. ....	29
<b>Cuadro 3.</b> Concentración de nutrientes (ppm) en solución nutritiva utilizada por etapa fenológica en el cultivo de tomate. ....	31
<b>Cuadro 4.</b> Diseño de campo y distribución de los tratamientos en la parcela del invernadero. Donde TRH: Tratamiento Riegos Horarios; CDI: Canaleta de Demanda Inteligente. Los cuadrantes del mismo color corresponden a tratamientos iguales. ....	32
<b>Cuadro 5.</b> Etapas del cultivo determinadas según la medición de parámetros morfofisiológicos para todos los tratamientos.....	43
<b>Cuadro 6.</b> Prueba de Fisher realizada a la desviación estándar de los niveles 10%, 20% y 30% de agotamiento en los tratamientos CDI y TRH. Donde n: número de muestra; E.E: error estándar. Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico. ....	48
<b>Cuadro 7.</b> Prueba de Fisher realizada al promedio total de humedad volumétrica obtenido en cada uno de los tratamientos. Donde n: número de muestra; E.E: error estándar. Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico.....	49



**Cuadro 8.** Rendimiento en kilogramos por metro cuadrado por cada tratamiento a lo largo del experimento. .... 56

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Interacción entre los diferentes componentes del manejo agronómico de cultivos hortícolas bajo invernadero. ....	16
<b>Figura 2.</b> Ubicación del invernadero de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM). Fuente: Google Earth. ....	24
<b>Figura 3.</b> Valores máximo promedio y mínimo de temperatura del aire (°C) y radiación fotosintéticamente activa total (mmol/m <sup>2</sup> ) obtenida dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de tomate híbrido Gladiador. ....	25
<b>Figura 4.</b> Curva de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco. ....	27
<b>Figura 5.</b> Ajuste lineal y ajuste cuadrático entre la longitud y ancho de hojas, donde longitud de hoja (cm) = $13,941806 + 0,8650234 \cdot \text{Ancho de hoja (cm)} - 0,0204196 \cdot (\text{Ancho de hoja (cm)} - 22,1897)^2$ . ....	36
<b>Figura 6.</b> Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de hojas y altura. Ecuación: Número de hojas = $9,4981774 + 0,0347366 \cdot \text{Altura (cm)} - 3,5732e-5 \cdot (\text{Altura (cm)} - 227,691)^2$ . ....	38
<b>Figura 7.</b> Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de frutos cuajados y altura, donde el número de frutos cuajados = $0,0077985 + 0,0680099 \cdot \text{Altura (cm)} - 0,0001974 \cdot (\text{Altura (cm)} - 227,691)^2$ . ....	39
<b>Figura 8.</b> Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de frutos cuajados y número de hoja, donde: Número de frutos cuajados = $-8,194959 + 1,3013649 \cdot \text{Número de hojas} - 0,0359796 \cdot (\text{Número de hojas} - 16,9111)^2$ . ....	41

**Figura 9.** Desarrollo de variables morfofisiológicas, según el método de control de riego, el tiempo térmico y las etapas del cultivo. I: Establecimiento; II: Desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: 50% de floración; III: 50% de floración; IV: Inicio de cosecha y V: Pico de cosecha..... 45

**Figura 10.** Valor promedio del desarrollo de las variables de longitud de hoja, ancho de hoja, diámetro de tallo, número de hojas y número de frutos cuajados en el experimento..... 47

**Figura 11.** Número de flores abiertas por tratamiento, en el eje superior se observa la cantidad de grados día acumulados por cada etapa. Donde I: establecimiento; II: desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: pico de floración; IV: fructificación y V; pico de fructificación..... 51

**Figura 12.** Índice de área foliar obtenido por cada tratamiento. Donde I: establecimiento; II: desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: pico de floración; IV: fructificación y V: pico de fructificación. .... 54

**Figura 13.** Rendimiento fresco total por tratamiento según categoría de primera (PF1): segunda (PF2), desecho (PFD). Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico. .... 56

**Figura 14.** Puntos de reinicio de la bomba para regar hasta la humedad volumétrica correspondiente a capacidad de campo (punto de arranque) obtenidos por cada método de control del riego en cada nivel de humedad durante el experimento. Las letras diferentes indica el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico. .... 60

## Resumen

Conocer el comportamiento morfofisiológico del cultivo de tomate permite tomar decisiones sobre el manejo del cultivo, tomando en cuenta parámetros como, por ejemplo, la arquitectura y distribución del dosel vegetal, número y tamaño de las hojas, número de frutos, entre otros. El estudio del desarrollo morfofisiológico del cultivo ante situaciones de estrés hídrico es vital para lograr obtener el mayor potencial productivo de las variedades utilizadas en Costa Rica. Con el objetivo de comprender la respuesta morfofisiológica del cultivo del tomate (*Solanum Lycopersicum*) ante el régimen hídrico y el tiempo térmico se realizó una investigación bajo condiciones de invernadero e hidroponía en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), donde se utilizó un arreglo bifactorial de 2x3 para analizar dos métodos de control de riego; la Canaleta Inteligente de Demanda (CDI) y el control por Riego Horario (TRH) y tres porcentajes de agotamiento del agua (10%, 20% y 30%) sobre la respuesta morfofisiológica del cultivo. Se analizaron nueve variables morfofisiológicas semanalmente durante el ciclo del cultivo según el régimen hídrico. El tratamiento CDI 30% siempre mostró resultados superiores en las variables de crecimiento, concordando en el rendimiento donde también fue superior, no se observó un efecto del tiempo térmico en el desarrollo del cultivo según tratamientos. El análisis estadístico se realizó por medio de JMP 9, utilizando la metodología de área bajo la curva, se obtuvieron resultados estadísticamente significativos y no significativos (dependiendo de la variable). Se concluye que el método de control de riego CDI, en cualquiera de sus porcentajes, permite a la planta un mejor desarrollo de las

variables de crecimiento donde se afecta positivamente la relación fuente sumidero, vegetativo/reproductivo y el desarrollo integral de la planta.

**Palabras clave:** Tomate, Morfofisiología, Riego, Inteligente

## Introducción

En Costa Rica existen condiciones climáticas que permiten la producción en campo abierto del tomate y la mayoría de los cultivos a lo largo del año sin interrupción, sin embargo los rendimientos no son óptimos debido a factores como la creciente presión de plagas y enfermedades, condiciones ambientales y el manejo; por lo que el estudio de variables como el manejo del riego y la medición de parámetros morfofisiológicos que permitan determinar el estado de la planta toman gran relevancia a la hora de ser competitivos en la producción de hortalizas ante países cercanos del trópico. Casos similares se han observado en Cuba como lo mencionan Ellein et al. (2017) donde se ha observado que los rendimientos registrados en varias áreas productivas del país son bajos, debido entre algunas causas a las desfavorables condiciones edafoclimáticas, de manejo, la falta de insumos que prevalecen.

Existen otros factores no climáticos que favorecen la crisis mundial del agua y que afectan los recursos de agua dulce en todas las escalas (UN, 2003). Por ejemplo, la cantidad y calidad del agua, son afectadas gravemente por actividades humanas como la agricultura principalmente, cambios en el uso del suelo, construcción, entre otros.

El uso del agua está vinculado principalmente a la evolución de la población, al consumo alimentario (incluidos los tipos de dieta), las políticas económicas (incluidas las de determinación del precio del agua), la tecnología, el nivel de vida y

a la valoración de los ecosistemas de agua dulce por parte de la sociedad (Bates et al, 2008).

La disponibilidad del agua en las plantas para cultivo es vital para la obtención de buenos rendimientos, por ejemplo, según la FAO citado por Bates et al. (2008) en la mayoría de las regiones del mundo, los cambios del clima intensificarán la demanda de riego, debido a los efectos conjuntos de una disminución de la lluvia y de un aumento de la evaporación vinculado al aumento de las temperaturas.

Aumentar la eficiencia del uso del agua (EUA) es vital, por ejemplo, por medio del fertirriego; permitirá aumentar la eficiencia en el uso del agua y la productividad del agua (costo de producción/m<sup>3</sup>) que son parámetros sobre los cuales los productores de hortalizas deberían considerar.

En campo abierto actualmente existen grandes problemas debido a que se obtienen rendimientos bajos y la contaminación ambiental es alta (debido a uso de fertilizantes, maquinaria, entre otros), ya que no se utilizan sistemas protegidos que cuenten con sistemas de precisión como fertirriego e instrumentos para la medición de parámetros morfofisiológicos como indicador de estado de la planta, entre otros. Rosegrant et al. (2014) mencionan que la implementación de estos sistemas puede mejorar la productividad por área, reducir el impacto ambiental negativo, disminuir el costo operativo y aumentar la sostenibilidad de los sistemas, y en dicho punto es dónde se encuentra el potencial del proyecto. Por lo tanto, la intención es promover la implementación de sistemas protegidos utilizando agricultura de precisión para generar beneficios al sector productivo de Costa Rica.

El fertirriego ha resultado una técnica promisoría en agroecosistemas hortícolas intensivos para abastecer adecuadamente con agua y nutrientes a estos cultivos durante su ciclo de producción, mediante el empleo de sistemas de riego localizado (Duarte et al, 2010). Los nutrientes son aplicados de forma exacta y uniforme solamente al volumen radicular humedecido, donde están concentradas las raíces activas (IMAS, 1999). Sin embargo, hace falta determinar los requerimientos hídricos y nutricionales con la mejor exactitud para el tomate híbrido Gladiador en la zona donde se realizó el estudio, para así poder aprovechar los beneficios de utilizar dichos sistemas, programando correctamente el fertirriego y conociendo la demanda de nutrientes en las diferentes etapas fenológicas del ciclo del cultivo.

El estado hídrico de la planta está directamente relacionado con factores fisiológicos y de rendimiento (Romojaro et al, 2007) por ejemplo, pérdidas del orden de 5% en el turgor de las células empieza a disminuir la calidad tanto de la parte vegetativa como reproductiva, en la calidad de cosecha se observa desde deshidratación hasta exceso de humedad en los frutos, es ahí donde el sistema de riego de precisión por fertirriego es de vital importancia, ya que permite al productor disminuir porcentajes de pérdida y aumentar el valor económico de la cosecha.

Sin embargo, la información disponible acerca de cultivos, por lo general ha sido generada para otras condiciones diferentes a las del trópico. Lo anterior hace referencia a que sí existe una necesidad real del productor, de incursionar en tecnologías innovadoras como fertirriego, monitoreo remoto del cultivo y métodos de control de plagas y enfermedades. Sin embargo, para aprovechar todas las



ventajas que ofrece el cultivo protegido, es de primer orden en importancia investigar, validar y adaptar dichas tecnologías a las condiciones tropicales locales.

El potencial de la investigación a realizar se debe a las ventajas que este esfuerzo de innovación tecnológica (utilización de fertirriego, monitoreo remoto de riego, medición de parámetros morfofisiológicos) conlleva; al trabajar con variedades que poseen bondades a la hora de producir (tolerancia a virus, calidad de fruta y vida poscosecha, así como tolerancia a hongos foliares, entre otros) da una gran ventaja a los productores de este país para mejorar la situación actual y producir mejores rendimientos.

El principal aporte del experimento es la realización de investigación e implementación de tecnologías que permitan lograr metas como las mencionadas en los párrafos anteriores, como la producción en ambientes protegidos, mejoramiento de cultivos, capacitación de agricultores, entre otros. Sin embargo, todo esto debe realizarse pensando en que la tecnología e información debe ser generada para las condiciones de Costa Rica.

## Marco teórico

### Cultivo del Tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum*), es una de las hortalizas que más se produce e industrializa en todo el mundo y de las de mayor valor económico debido a que esto genera una fuerte actividad económica en el país y su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (Alfonso et al 2017 citando a Casanova et al 2010). Para el 2016 el consumo per cápita rondó los 17,3 kg (López, 2016).

En el periodo 2015-2016 se registraron 1014 productores, con un área de siembra de 1171,9 ha y una producción de 69 040,45 t (López y Quirós, Y 2016).

Es una planta cultivada como anual, herbácea y apreciada por sus frutos, forma parte de la familia de las solanáceas (Gorini, 2018). Según Tanaka y Fujita, 1974; Chamarro, 1995, quienes describieron la planta de tomate la planta posee las siguientes características principales:

- Posee una raíz principal (corta y débil)
- Cuenta con pocas raíces secundarias (numerosas y potentes)
- El tallo es de 2 a 4 cm de grosor en la base, sobre él se van desarrollando las hojas, los tallos secundarios (ramificación simpodial) y las inflorescencias
- En la parte distal se encuentra el meristemo apical, donde se inician los nuevos primordios foliares y florales
- Las hojas son compuestas, imparipinnadas y están conformadas por los folíolos peciolados

- La flor es regular e hipógina, posee aproximadamente cinco sépalos dependiendo de la variedad e igual número de pétalos de color amarillo

Los cultivos de tomate y chile dulce generan aproximadamente 5000 empleos directos y hasta 20000 empleos indirectos en Costa Rica debido a su intensivo manejo (López, 2012) por lo que dicha actividad representa un gran valor económico para el país.

Sin embargo, existe una residualidad alta debido a una excesiva aplicación de agroquímicos, alta degradación del suelo y la contaminación por lixiviación de químicos al subsuelo, las cuales son muy elevadas (Estado de la Nación, 2003).

### **Material vegetal**

El híbrido F1 Gladiador, posee características beneficiosas para su cultivo como:

- Fruto globular de color rojo intenso y muy firme.
- Planta de crecimiento indeterminado.
- Posee poco follaje y está bien adaptada para producción bajo invernadero.
- El peso promedio ronda los 300-350 gramos.

El híbrido Gladiador fue escogido por sus características de resistencia al virus de la cuchara (TYLCV), resistencia a hongos foliares y su alta productividad, además de que el mismo tiene la característica de que mantiene el calibre del fruto aún en etapas avanzadas en la fructificación del mismo.

## **Importancia de la morfofisiología**

Las características anatómicas y fisiológicas del cultivo, tales como arquitectura y distribución del dosel vegetal, número y tamaño de las hojas y la densidad estomática, entre otros, dependen del patrón de crecimiento, y definen los requerimientos hídricos y minerales del cultivo (Escobar et al., 2009)., por lo que el estudio del desarrollo morfofisiológico del cultivo ante situaciones de estrés hídrico es vital para lograr obtener el mayor potencial productivo de las variedades utilizadas en Costa Rica.

Según Gautier et al (2001) la medición de parámetros morfofisiológicos de la planta es de vital importancia debido a que algunas de ellas controlan el equilibrio vegetativo/reproductivo y el régimen hídrico juega un papel importante en dicho balance, normalmente en el cultivo de tomate, la disponibilidad de nutrientes para la planta no es el problema sino la cantidad de agua disponible para funcionamiento normal del metabolismo de la planta.

Muchas variables que ejercen efecto sobre la morfofisiología como la producción de hojas, crecimiento de la planta, producción de flores, cuajado de frutos, efecto de la luz fotosintéticamente activa (PAR), entre otros son parte de variables que afectan el crecimiento de la planta, por ejemplo, según Sandri *et al* (2003) existen límites mínimos de luz PAR por debajo de los cuales las plantas no pueden producir suficiente materia seca para obtener rendimientos aceptables, en conclusión, si la planta no es capaz de producir materia seca (vegetativa o reproductiva), los rendimientos se reducirían por lo que monitorear la luz PAR y sus variables relacionadas es de vital importancia.

La cantidad de flores abiertas y frutos cuajados es un indicador clave en el desarrollo de la planta ya que indica la cantidad de sumideros posibles a los que la planta debe suplir con fotoasimilados. Por lo tanto, se debe entender la relación hojas/frutos, necesaria para favorecer un crecimiento adecuado de la planta (Escobar et al., 2009).

La manipulación de parámetros morfofisiológicos se demuestra en literatura citada por Gautier et al., (2001) quien mencionó que la remoción de 2/3 de la cantidad total de flores puede favorecer el crecimiento de frutos de mejor forma y tamaño, es decir se favorece la redirección de asimilados hacia la producción de frutos, sin embargo, el mismo concepto puede ser utilizado provechosamente para modular el crecimiento vegetativo.

### **Tiempo térmico**

Los procesos de desarrollo y crecimiento en las plantas se ven ligados a distintos factores ambientales, entre los cuales se encuentra la temperatura. Para organismos como las plantas, la acumulación de temperatura para pasar de un estado a otro en su ciclo de crecimiento y desarrollo es vital, de forma que influye sobre procesos metabólicos, disponibilidad de nutrimentos, absorción de agua y difusión dentro de la planta (Almanguer et al. 2011).

Según Garabatos (1991), Hoyos et al. (2012) y Qadir et al. (2007) el valor universal de temperatura en el ámbito fisiológico son los grados día de desarrollo (GDD) comúnmente utilizados para estimar y medir el desarrollo de las plantas. Estos índices han sido aplicados en numerosos sistemas de producción de

hortalizas para predecir la madurez fisiológica, la fecha de cosecha y el momento de siembras sucesivas.

La acumulación térmica es la acumulación de grados de temperatura diarios, que constituye la energía necesaria para cumplir su ciclo ontogénico. Esta acumulación se expresa, mediante distintos procedimientos, como unidades térmicas o grados día. La acumulación residual de grados día considera para su determinación la temperatura base a partir de la cual se ejerce acción positiva sobre el crecimiento y desarrollo vegetal, la cual es variable para cada cultivo (Garabatos, 1991).

Lo principal acerca del concepto de grados día de crecimiento es la aplicabilidad en una gama amplia de aspectos de interés agronómico, como lo describen Agüero et al. (2009) y Ardila et al. (2011) muchas aplicaciones que el concepto de grados días aporta para una producción más estratégica, por ejemplo:

- Programación de fechas de siembra o ciclos de cultivo
- Pronóstico de fechas de cosecha
- Determinar el desarrollo esperado en diferentes localidades
- Determinar el desarrollo esperado en diferentes fechas de siembra o inicio del ciclo de cultivo.
- Determinar el desarrollo esperado de diferentes genotipos
- Pronosticar coeficientes de evapotranspiración de cultivo

Se puede determinar la duración del ciclo de desarrollo (en términos de grados día) utilizando las temperaturas mínimas y máximas a las que se desarrolla el cultivo, la temperatura base en el caso del tomate es de 10°C Ardila et al. (2011).

### **Manejo del riego y la eficiencia en el uso de agua**

El agua desempeña un papel crucial en la producción mundial de alimentos y según Bates et al (2008) citando a FAO (2003) más de un 80% de las tierras agrícolas del mundo depende de la lluvia; en esas regiones, la productividad de los cultivos depende únicamente de una precipitación suficiente para satisfacer la demanda evaporativa y la consiguiente distribución de humedad del suelo, por lo que aumentar la eficiencia con la cual se utiliza éste recurso es de vital importancia para aumentar la producción, disminuir la contaminación y realizar medidas de mitigación ante la crisis del agua.

Según reportes de la FAO (2013) para el año 2025, la población de personas que viven en zonas donde existe déficit hídrico severo constante será de 3200 millones. Además, la demanda y el suministro de agua para riego aumenta paulatinamente, influenciada principalmente por la alteración de los regímenes hidrológicos a través de cambios en la precipitación, evaporación potencial y escorrentía en las cuencas de los ríos (Arnell (2004); Hitzand & Smith (2004); Rosenzweig *et al.* (2004); Oki & Kanae (2006).

Según Foladori (2002) desde la década de los 60's ya existe consciencia real sobre la problemática de la sustentabilidad ambiental/social y si se adiciona el factor de crecimiento poblacional se ejerce una presión sobre el consumo de recursos e incrementa los residuos, consecuentemente surge la necesidad de utilizar tecnologías innovadoras que nos permitan optimizar la producción de recursos y disminuir la cantidad de residuos.

En la investigación realizada por Tilman et al. (2002) se proyecta un crecimiento poblacional de 9000 millones de habitantes en el 2050, son 2000 millones de habitantes más que requerirán alimentación, con las mismas áreas de producción. Ante dicho incremento en la demanda mundial de alimentos, habrá por consiguiente un aumento en el consumo de fertilizantes, agua (Galloway, 2004) y del uso de servicios, lo cual se verá reflejado en el índice de contaminación ambiental; en el caso específico de los fertilizantes, por ejemplo, por medio de la lixiviación de nutrientes a mantos acuíferos subterráneos y superficiales (Galloway, 2004). Lo anterior genera uno de los retos más importantes para el planeta, que es producir mejores rendimientos, con áreas más reducidas y con recursos más limitados.

Además, FAO (2003) menciona que la demanda y la disponibilidad de agua por efecto del cambio climático afectará notablemente a las actividades agrícolas, a la seguridad alimentaria y muchas otras actividades humanas. Ante la creciente escasez de los recursos hídricos destinados para la agricultura y el alto costo de los



insumos agrícolas, resulta indispensable buscar alternativas tecnológicas que reduzcan los costos de producción y que, al mismo tiempo permitan obtener rendimientos superiores a los actuales.

La restricción hídrica limita la producción agrícola debido a que el agua comprende entre el 80%-90% de la biomasa de los tejidos vegetales y cumple funciones a nivel estructural, bioquímico, termorregulador y transportador (Rodríguez, 2015) las cuales son funciones primordiales para el desarrollo óptimo de la planta.

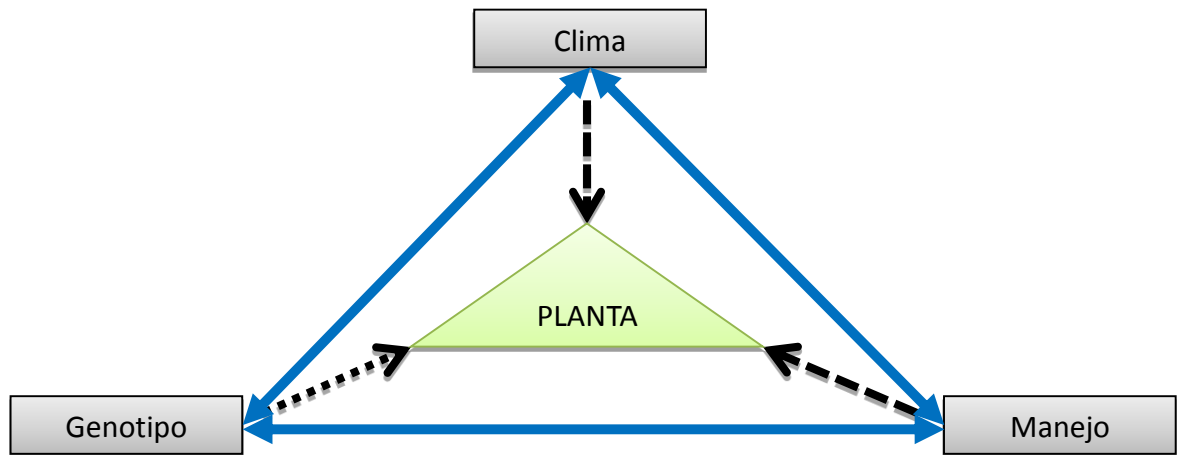
La necesidad de maximización en el uso de recursos es inminente, en función de la optimización de recursos actualmente el sistema de riego por goteo en el cultivo del tomate se ha incrementado, sobre todo en las regiones donde el agua es escasa, como ejemplo Armenta et al (2001) expuso el caso de Sinaloa, principal productor de tomate en México.

En estas regiones productoras de tomate se hacen aplicaciones excesivas de fertilizantes, principalmente de nitrógeno y potasio. Con el sistema de fertirriego se ha reducir más de 50 % la aplicación de fertilizantes, obtener un ahorro económico y un menor deterioro del ambiente y hacer un uso más eficiente del agua, logrando reducir en más del 50 % su uso, por lo que se justifica utilizar dicho sistema de riego en ambientes protegidos.

Ramírez & Nienhuis (2012) mencionan que a pesar de que en Costa Rica los suelos son aptos para la agricultura y de que existe desarrollo agrícola, el cambio climático, la presión de plagas y el crecimiento urbanístico exigen una redirección de los sistemas a producción a sistemas más eficientes, donde sea posible optimizar rendimientos, reducir costos y aumentar la sostenibilidad de los sistemas, integrando todos los factores relacionados con la producción agrícola.

### **Morfofisiología del cultivo en función del clima, el genotipo y el manejo agronómico**

En la figura 1 se muestra la interrelación entre el clima, el genotipo y el manejo agronómico del cultivo; dicha interacción es clave en el comportamiento morfofisiológico del mismo, porque influencia la tendencia en el patrón de crecimiento ya sea hacia un comportamiento vegetativo (tallos, hojas) o productivo (flores, fruto), lo cual está directamente relacionado con el rendimiento del cultivo.



**Figura 1.** Interacción entre los diferentes componentes del manejo agronómico de cultivos hortícolas bajo invernadero.

La horticultura en general se ha caracterizado por ser un sistema de producción sumamente intensivo y dinámico (Del pino et al, 2012). Aunado a esto, la agricultura ha evolucionado en lo que a tecnología se refiere, INCYTU (2018) menciona algunos pilares de la agricultura del futuro, por ejemplo:

- Sistemas de posicionamiento global
- Sistemas de información geográfica
- Sensores remotos
- Monitores de rendimiento y aplicación
- Maquinaria inteligente

Sin embargo, en Costa Rica aún falta hacer uso masivo de dichas herramientas para realizar diagnósticos del estado del cultivo en cuanto a lo fisiológico y lo fitosanitario para lograr aumentar los rendimientos INCYTU (2018)

mediante la toma de decisiones más eficientes. Lo anterior resalta la importancia de contar con instrumentos que, desde lo técnico, sirvan de soporte para la evaluación del crecimiento, desarrollo del cultivo y del estado sanitario del mismo.

Conocer la interacción entre variables morfofisiológicas y el equilibrio dinámico es de suma utilidad en el manejo, por ejemplo, en casos donde existe una alta carga de frutos se ha observado un área foliar de menor tamaño (Gautier, et al, 2001). Sandri et al. (2003) en etapas avanzadas del ciclo del tomate, existe una competencia fuerte por parte de los frutos hacia los órganos vegetativos, competencia por recursos agua, nutrientes, entre otros, equilibrando así la relación.

El manejo de la interacción entre el clima, genotipo, manejo y la planta es muy importante. Al respecto, Gautier *et al* (2001) mencionan que si una planta es expuesta a una condición ambiental de déficit de presión de vapor (la cual está directamente afectada por el riego) va a repercutir en el desarrollo de variables morfofisiológicas como la calidad de las hojas debido a que un déficit de presión de vapor alto puede generar una conductancia estomática más baja y a su vez, un menor intercambio de gases. Lo anterior demuestra la interrelación multifactorial y la repercusión que sufre el llamado “continuo suelo-planta-atmósfera”, que es el medio por el cual es posible entender la interacción planta-ambiente.

En la presente investigación el agua es un factor preponderante, según Onder et al. (2005) el déficit hídrico puede provocar una reducción en el crecimiento

por inhibición de procesos fisiológicos y bioquímicos como la fotosíntesis neta, la respiración, la translocación, el suministro y metabolismo de iones.

Lo anterior también puede afectar el crecimiento de estructuras de la planta de vital importancia como la raíz y las hojas así mismo su relación raíz/parte aérea, la caída de hojas y frutos, el cierre de las estomas (por ende, la reducción en el intercambio gaseoso), entre otros. En términos generales a nivel de cultivo, el déficit hídrico genera reducción en el crecimiento y productividad (Onder et al., 2005).

Sin embargo, al tratarse en esta ocasión de un híbrido de tomate utilizado en Costa Rica bajo condiciones específicas, aún no existe información detallada sobre su comportamiento.

Aun utilizando los sistemas automatizados como el de fertirriego, existen inconvenientes para lograr explotar el potencial máximo de una variedad. Es necesario precisar la dosis de fertilizantes que debe utilizarse para incrementar la eficiencia y aprovechamiento de los nutrimentos.

Es importante cuantificar la demanda nutrimental diaria del cultivo para calcular su demanda total, Duarte et al (2010) sugirieron determinarlo en base al rendimiento en materia seca total y/o el requerimiento interno del nutriente de interés, teniendo en cuenta la distribución de la materia seca por componentes de la planta como un equilibrio funcional.

## **Cultivo sin suelo**

La agricultura sin suelo se basa es un conjunto de técnicas que permite el cultivo de plantas en un medio libre de suelo, al ser un sistema aislado del mismo, es utilizado para cultivar plantas cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos nutricionales a partir del agua (por medio de la solución nutritiva). Con la técnica de cultivo sin suelo es posible hacer un uso más eficiente del agua y los nutrientes y obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, permitiendo (Beltrano & Gimenez, 2015).

Según Beltrano & Giménez (2015) el cultivo sin suelo es una herramienta útil ya sea al realizar grandes emprendimientos como sistemas pequeños de cultivos sin suelo de forma tal que es posible obtener productos para una alimentación sostenible.

Desde el punto de vista económico tiene una ventaja primordial sobre los demás sistemas, que es la densidad de siembra (permite una mayor cantidad de plantas por metro cuadrado). Esto es muy notorio cuando se trata de plantas como por ejemplo fresas y lechugas, así como también al cultivar forraje hidropónico. Además, existe un control sobre la nutrición vegetal gracias al uso de soluciones nutritivas; permitiendo obtener un fruto estandarizado, de mejor tamaño y calidad (Beltrano & Giménez, 2015).

## **Ambientes protegidos**

El 90 % de la producción se realiza a campo abierto durante la época seca y en un ambiente semiprotegido en época lluviosa, solo el 10 % se realiza en un ambiente protegido (López, 2016) por lo que hace falta explotar los beneficios del sistema.

El cambio climático es un fenómeno que impactará directamente los rendimientos potenciales del cultivo a campo abierto, ya sea por exceso o déficit de lluvias, vientos fuertes y altas temperaturas. Según Soto (2017) en Costa Rica el rendimiento promedio de tomate es de 70 TM ha<sup>-1</sup>, y por medio de la implementación de dichas técnicas es posible incrementar los rendimientos hasta 300 TM ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, los rendimientos actuales son relativamente bajos debido a la falta de investigación para el desarrollo y adaptación de tecnologías para los genotipos a las condiciones locales. Por lo que es necesario validar metodologías para implementar el cultivo intensivo tanto en sistemas de ambientes protegidos como en campo abierto.

Frente a condiciones climáticas adversas, la posibilidad de realizar la siembra de cultivos dentro de una estructura, que además permite modificar y/o controlar los factores climáticos sobre el cultivo se convierte en un factor clave para el aumento

---

<sup>1</sup> Soto, F. 2017. Rendimiento de tomate en Costa Rica (diálogo). Alajuela, Costa Rica, Universidad de Costa Rica.

en rendimiento. El cultivo protegido supone la creación de un ambiente que proteja a las plantas y permita controlar al máximo factores de producción como: el uso del agua, la fertilización, la luz, dióxido de carbono, temperatura y humedad (Castilla, 2007; Gil-Vázquez et al, 2003).

Ramírez & Nienhuis (2011) plantearon que el invernadero permite el cultivo de hortalizas minimizando el efecto de las plagas y enfermedades en localidades con condiciones climáticas adversas. Además, existe un factor clave, tanto en lo económico como en el ámbito de la salud, Ramírez & Nienhuis (2011) mencionan que dicho factor es la carga de agroquímicos que el cultivo requiere, ya que el sistema permite disminuir sustancialmente las aplicaciones de plaguicidas químicos y puede potenciarse el uso del control biológico al contarse con un ambiente más controlado.

Según IMAS (1999) por lo general el cultivo crece en sustratos, los cuales podrían tener la característica de poseer una baja capacidad de retención de agua y por ende, una pequeña reserva de nutrientes y agua, por lo que los sistemas de riego proporcional por goteo son muy sensibles y tienen una baja capacidad de recuperación frente a cualquier error o desajuste en el fertirriego. Lo anterior implica que los ciclos de fertirriego deben ser frecuentes, homogéneos y precisos. El aporte de nutrientes debe ser completo (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes) y el pH debe mantenerse constantemente dentro de los valores adecuados. El monitoreo del agua de riego y de drenaje debe ser riguroso.



En Costa Rica poco a poco algunos agricultores han incursionado en la producción en ambientes protegidos (invernaderos) de baja inversión, buscando aprovechar las potenciales ventajas socioeconómicas, agronómicas y ambientales que el sistema presenta.

Bertsch (2006) menciona que en Costa Rica, en los últimos años la distribución del uso del suelo ha cambiado por otras actividades diferentes a la agricultura, por ejemplo la construcción de residenciales y el desarrollo comercial e industrial, desplazando la agricultura a terrenos en zonas marginales o con aptitudes de suelo y clima inconvenientes para los cultivos hortícolas, por lo que el uso de sistemas protegidos, no dependientes del suelo son una opción excelente para optimizar rendimientos (producir más en un área más pequeña).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de dos diferentes estrategias del manejo del riego sobre la morfología del híbrido de tomate Gladiador, en hidroponía y bajo invernadero.

### **Objetivos específicos**

1. Caracterizar los cambios en el desarrollo de variables de crecimiento vegetativo y reproductivo del híbrido de tomate Gladiador, en hidroponía y bajo invernadero, asociados a los grados día, bajo dos métodos de control de riego y tres diferentes regímenes hídricos.
2. Determinar el efecto del régimen hídrico y método de control de riego sobre el desarrollo de variables morfofisiológicas del cultivo.
3. Caracterizar el rendimiento del híbrido de tomate Gladiador, en hidroponía y bajo invernadero, asociado a los grados día, bajo dos métodos de control de riego y tres diferentes regímenes hídricos.

## Metodología

### Ubicación del experimento

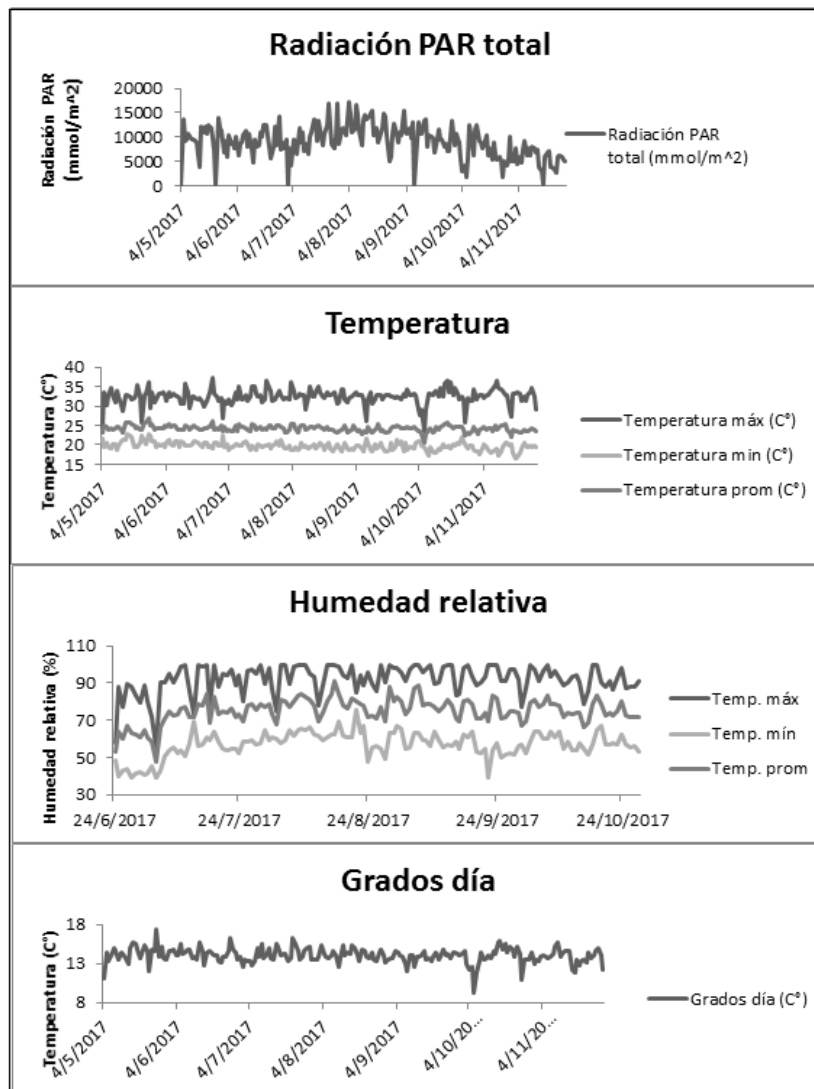
El proyecto se llevó a cabo en el invernadero de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno ( $10^{\circ}00'22$  N;  $84^{\circ}15'57$  W), ubicado en el distrito San José de Alajuela a 840 msnm. El promedio de precipitación anual es de 1940 mm distribuidos de mayo a noviembre y el promedio anual de temperatura ambiente es de  $22^{\circ}\text{C}$  (Fig. 3).

En la Figura 2 se observa la ubicación del mismo en una fotografía satelital de Google Maps.



**Figura 2.** Ubicación del invernadero de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM). Fuente: Google Earth.

A continuación (Fig. 3), se observan las condiciones climáticas que estuvieron presentes durante la realización del experimento. Es importante destacar que las condiciones climáticas fueron monitoreadas antes de la siembra y después de finalizar la cosecha.



**Figura 3.** Valores máximo promedio y mínimo de temperatura del aire (°C) y radiación fotosintéticamente activa total (mmol/m<sup>2</sup>) obtenida dentro del invernadero, durante el ciclo de cultivo de tomate híbrido Gladiador.

## Material vegetal

Se utilizó el híbrido F1 Gladiador de la casa comercial Agrinova seeds, el mismo fue escogido principalmente por la característica de resistencia al virus de la cuchara (TYLCV), ya que en ensayos preliminares se observó la presencia del mismo en las plantas de las cuales se originó el almácigo.

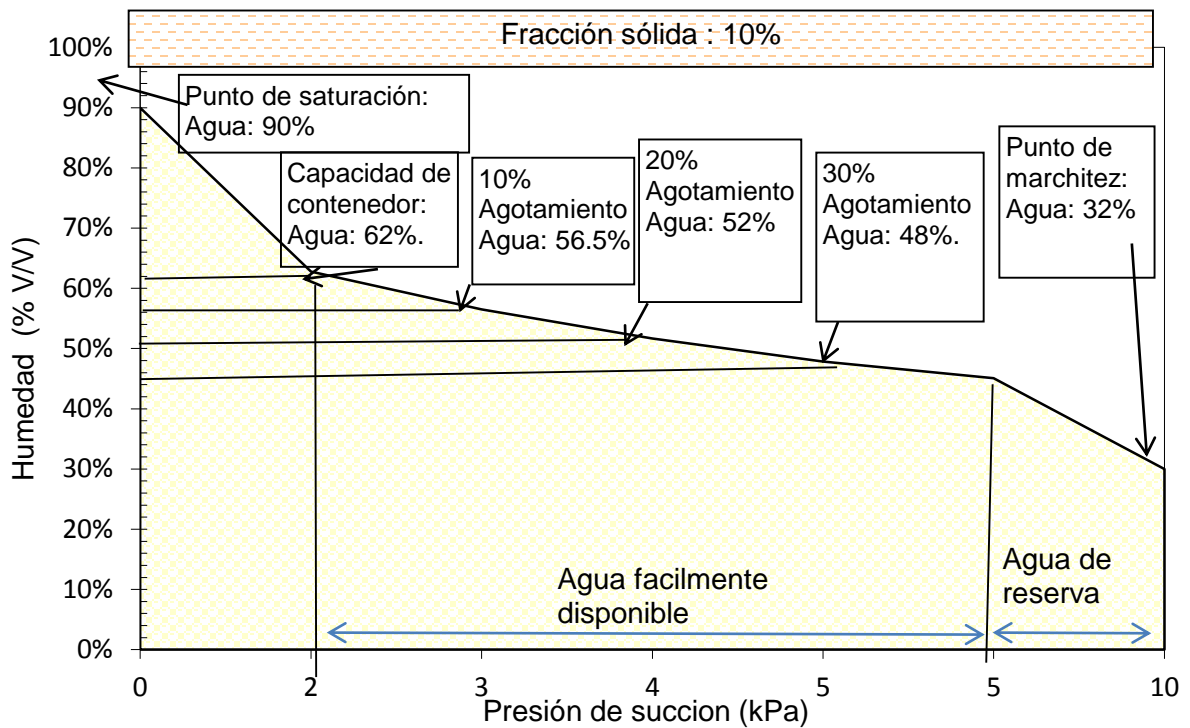
## Medio de cultivo

El sustrato utilizado en el experimento fue fibra de coco de textura media (marca FICO<sup>®</sup>) en pacas de 3 kg sin hidratar (Cuadro 1), las dimensiones fueron de 16 x 3.5 x 100 cm. La hidratación del sustrato se realizó en riegos cortos de 20 minutos hasta el punto de saturación, alcanzando un volumen de 28,8 L/cada una. Se realizaron dos cortes en forma de T invertida en la base de la bolsa del sustrato para drenar el exceso de agua.

**Cuadro 1.** Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero.

Características físicas	Fibra de coco	% optimo
Partículas < 1 mm = índice de grosor (%)	65.35	--
Densidad aparente (gr cm <sup>-3</sup> )	0.07	--
Densidad real (gr cm <sup>-3</sup> )	0.65	--
Porosidad total (%)	90	> 85%
Partículas sólidas (%)	10	< 15%

La curva de liberación de agua y aire es una herramienta útil para determinar el agua fácilmente disponible para planta, la capacidad de campo y el punto de marchitez (Fig. 4).



**Figura 4.** Curva de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco.

### Descripción de los tratamientos

Se aplicaron seis tratamientos que combinaban dos métodos de control del riego con tres niveles de agotamiento del agua total disponible en el sustrato (10%, 20% y 30%). Los métodos de control del riego fueron:

- Canaleta de Demanda Inteligente (CDI), que consistió en un método de control de riego inteligente donde la planta, al consumir el agua fácilmente disponible en el sustrato alcanza un porcentaje mínimo de humedad volumétrica establecido, en ese punto envía una señal de riego ante un corte eléctrico cuando el nivel de humedad (controlado por un micro tensiómetro) ha sobrepasado el nivel inferior (Cuadro 2).
- Riegos horarios (TRH), que consistió en el sistema convencional de programación manual semanal por medio de un cronómetro, ligado a un sensor de humedad para el monitoreo de la misma.

Se utilizaron dos métodos de control de riego (CDI y el TRH), por medio de los cuales se midió la humedad volumétrica (HV) en el sustrato. Se estableció la HV correspondiente a capacidad de campo (CC) y al punto de marchitez permanente (PMP), por medio de una calibración previa.

La calibración consistió en la medición de la HV en intervalos de tiempo conocidos, mediante la aplicación de un volumen conocido de agua, midiendo simultáneamente el volumen de agua en el denaje. De forma que se estableció el punto de capacidad de campo (CC) cuando la aplicación agua de riego no presentó denaje y el sustrato se encontró saturado, estableciendo los porcentajes de HV observados en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Porcentaje de humedad volumétrica correspondiente para cada porcentaje de agotamiento de agua de riego según la curva realizada In situ en el invernadero.

<b>Agotamiento (%)</b>	<b>Humedad volumétrica (%)</b>
<b>10</b>	<b>55.8</b>
<b>20</b>	<b>50.7</b>
<b>30</b>	<b>47.7</b>

### **Sistema de riego**

El sistema de riego consistió de tres bombas y dos tanques de 2500 litros donde se distribuyó el agua de riego por medio de cintas de goteo proporcional de polietileno en sustrato de fibra de coco.

El riego fue controlado por medio de electroválvulas, que al percibir el estímulo de la señal eléctrica activaban el solenoide que permitían el paso del agua hacia las cintas de riego. Controlado por un Arduino.

Los goteros utilizados fueron autocompensados y antidrenantes con un caudal de 2 L h<sup>-1</sup>.

### **Cálculo de Grados Día**

Para determinar el tiempo térmico se realizó el cálculo de la acumulación de grados día, según la fórmula utilizada por Ardila et al. (2011):



$$GDC = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_{base}$$

Donde:

- T<sub>max</sub>, temperatura máxima diaria del aire
- T<sub>min</sub>, temperatura mínima diaria del aire
- T<sub>base</sub>, es la temperatura en que el proceso metabólico del tomate es mínimo (10°C) (Ardila et al. 2011).

### **Manejo del cultivo**

Todos los tratamientos llevaron la misma fertilización, diseño hidráulico de riego, podas, prácticas culturales y manejo integrado de problemas fitosanitarios.

El manejo fitosanitario se realizó mediante monitoreos semanales que indicaban la necesidad de aplicación de productos o bien de realizar prácticas culturales para solventar los problemas fitosanitarios. Durante el proyecto se utilizaron productos desde repelentes hasta productos químicos para eliminación de plagas y/o enfermedades.

La siembra se realizó por trasplante, utilizando plántulas de 28 días de edad con aproximadamente 4-5 hojas verdaderas. La distancia entre plantas fueron 150 cm entre hileras y 33 cm entre plantas, para una densidad de siembra de 2,0 plantas m<sup>2</sup>.

Con respecto al tutorado de la planta, se manejaron plantas a un solo tallo, sostenido por una cuerda hasta los cables de soporte, donde semana a semana se acortó la cuerda por medio de una prensa de plástico.

Se realizaron podas de brotes laterales para mantener un balance en la arquitectura de la planta y así evitar un desbalance en la relación fuente/sumidero.

La nutrición se aplicó mediante soluciones nutritivas iónicamente equilibradas entre cationes y aniones; con pH ajustado a 5,5 con ácido nítrico al 55%, por medio de riego por goteo.

Los fertilizantes utilizados fueron el fosfato mono potásico, sulfato potásico, sulfato magnésico, nitrato cálcico, nitrato potásico y premezclas de micronutrientes (Cuadro 3), fueron mezcladas en soluciones madre concentrada 80 veces y diluida con una mesa de inyección Sistema multi inyección AZUD QGROW BASIC (Azud, 2018) . Algunos elementos menores como el Zn y el Mo se aplicaron foliarmente según necesidad.

**Cuadro 3.** Concentración de nutrientes (ppm) en solución nutritiva utilizada por etapa fenológica en el cultivo de tomate.

Etapa fenológica	Duración (semana)	Elemento (ppm)												
		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	15	159	50	287	51	181	113	1	2	0	1	0	1	0



fisiológicos de las plantas, que son indicadores del comportamiento vegetativo reproductivo del cultivo:

### **Crecimiento del tallo principal**

Se midió cada semana, inicialmente se utilizó una cinta métrica desde la base del tallo al eje apical de la planta, sin estirar las hojas. Posteriormente conforme la planta fue creciendo el tallo se colocó en forma de espiral en la base de la planta y se midió con una cinta métrica flexible, desde la base hasta el ápice de la planta. Al final del ciclo se determinó la longitud total del tallo, como la sumatoria del crecimiento semanal.

### **Longitud y ancho de la hoja**

Se midió con una cinta métrica desde la unión del peciolo con el tallo hasta el extremo distal de la hoja, en una hoja completamente desarrollada que corresponde aproximadamente a la sexta hoja más joven.

### **Diámetro basal del tallo**

Se midió con un pie de rey, en la base del tallo aproximadamente 5 cm por encima del nivel del sustrato.

### **Número de hojas**

Se cuantificó por medio de un conteo manual a partir de la tercera más joven completamente expandida y sana. Las hojas bajas dañadas o incompletas no se consideraron.

### **Número de flores abiertas**

Se cuantificó por medio de un conteo manual en todos los racimos en desarrollo, antes del marchitamiento de los pétalos y del cuaje del fruto.

### **Número de frutos cuajados**

Se realizó un conteo manual de todas las flores que han llegado a cuajar el fruto, y así sucesivamente durante todo el ciclo.

### **Índice de área foliar**

Se midió utilizando un ceptómetro modelo Accu PAR LP-80 de Decagon Devices, que produce estimaciones del IAF utilizando la diferencia de la luz PAR incidente sobre las hojas y debajo de las mismas.

### **Radiación fotosintéticamente activa interceptada**

Se midió semanalmente, por medio del ceptómetro Accu PAR LP-80 de Decagon Devices en dos puntos por tratamiento y a dos alturas (sobre y bajo el dosel del cultivo).

### **Rendimiento**

Se caracterizó semanalmente en una muestra de 26 plantas por peso de frutos en base a la norma de calidad de Walmart 2017, separando tres calidades:

1. Primera: 250-190 g
2. Segunda: 190-140 g
3. Desecho: 140 g o menos

## **Análisis estadístico**

Los datos experimentales se sometieron a un análisis estadístico por medio del programa JMP 9 (JMP®, 2018) basado en la metodología de área bajo la curva (Dawson, 2009). Se realizó un análisis normalidad y homogeneidad.

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) que determinó las diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, ya sea entre porcentajes, métodos o la interacción de los mismos en función del tiempo térmico en el desarrollo de las variables morfofisiológicas del cultivo.

Se realizó una prueba de Fisher para determinar la aceptación o el rechazo de la hipótesis alternativa.

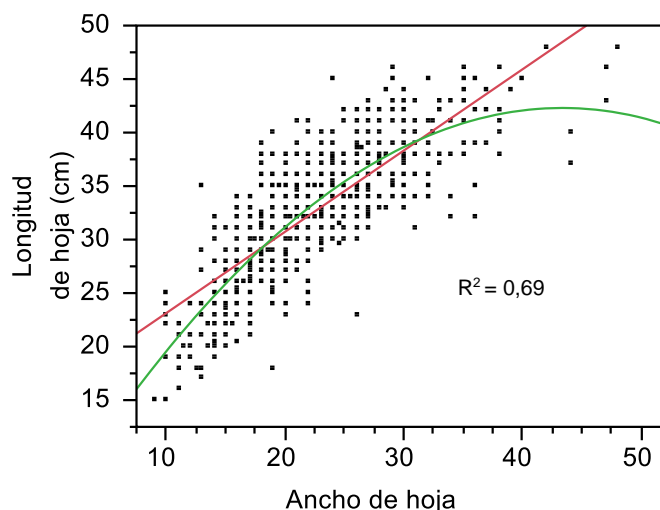
Se realizó una comparación múltiple utilizando la metodología de correlación y regresión. Cuando la interacción fue significativa se utilizaron comparaciones múltiples corregidas por medio de la ecuación de Bonferroni.

## Resultados y discusión

En el presente experimento se analizó el efecto del régimen hídrico sobre la morfofisiología del tomate, donde se observó diferencias significativas ( $P < 0.005$ ) en método, porcentajes de agotamiento y en la interacción de los mismos según la variable analizada. El método de control de riego CDI en sus tres niveles obtuvo los valores más altos y de igual forma en el rendimiento del cultivo.

### Ajustes cuadráticos de las variables

En la Figura 5 se presenta la relación entre las variables longitud y ancho de hoja ( $R^2 = 0,69$ ), donde se observa que el ajuste cuadrático con dichas variables es de 69%, esto quiere decir que el 69% de los cambios en la longitud de la hoja, puede ser explicados por medio de cambios en el ancho de la misma.



**Figura 5.** Ajuste lineal y ajuste cuadrático entre la longitud y ancho de hojas, donde longitud de hoja (cm) =  $13,941806 + 0,8650234 \cdot \text{Ancho de hoja (cm)} - 0,0204196 \cdot (\text{Ancho de hoja (cm)} - 22,1897)^2$ .

Según Barrera et al. (2010) citando a Goudrian & Van Laar (1995) en las plantas, todos los procesos relacionados al crecimiento y desarrollo de estructuras (o procesos) son complejos, que responden a directamente a la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros. Los mencionados anteriormente están totalmente relacionados a factores como la temperatura, intensidad de luz, entre otros, en la Figura 5 se observa que conforme aumenta la variable de largo lo hace también el ancho de la hoja, brindando a la planta mejores características morfológicas, por ejemplo, en recepción de luz.

Los resultados anteriores ratifican lo discutido por Shingleton (2010), que menciona que la alometría es la razón por la cual existe una alta correlación entre el ancho y la longitud de la hoja, ya que la misma establece que los cambios en las dimensiones relativas de las partes de un organismo y el tamaño total del mismo son altamente correlacionables.

Lo anterior quiere decir que existe una gran relación entre los cambios en la forma y el tamaño del organismo; dicha relación es aplicable a las dimensiones de las partes del mismo.

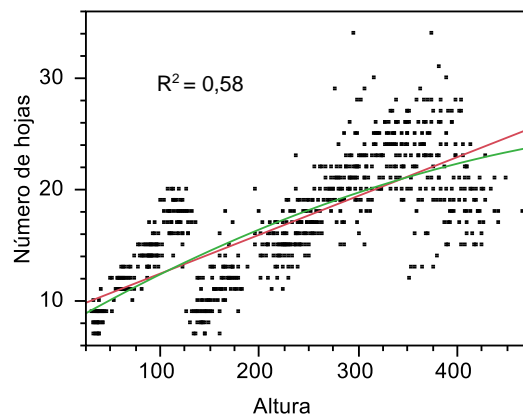
Gardner *et al.* (1985) y Rodríguez & Leihner (2006) plantean el concepto de relaciones isométricas, el mismo menciona que la forma no cambia, pero sí el tamaño en las medidas lineales de las hojas como el largo, el ancho y el índice de área foliar (IAF), de modo que, esta relación se puede probar mediante análisis de regresión entre las variables indicadas, lo cual respalda los resultados obtenidos.

En la Figura 5 se muestra que cerca del 70% de los cambios en la variable del ancho pueden ser explicados por longitud, lo cual para efectos prácticos permite



ahorrar tiempo en la toma de mediciones y decisiones, por ejemplo, para determinar los cambios en el patrón de crecimiento vegetativo y/o reproductivo.

En la figura 6 se observa la relación entre las variables de número de hojas y altura por medio de un coeficiente de determinación de 0,58 ( $R^2$ ) mostrando que el 58% de los cambios en el número de hojas, pueden ser explicados por los cambios en la altura de la planta.



**Figura 6.** Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de hojas y altura. Ecuación: Número de hojas =  $9,4981774 + 0,0347366 \cdot \text{Altura (cm)} - 3,5732e-5 \cdot (\text{Altura (cm)} - 227,691)^2$ .

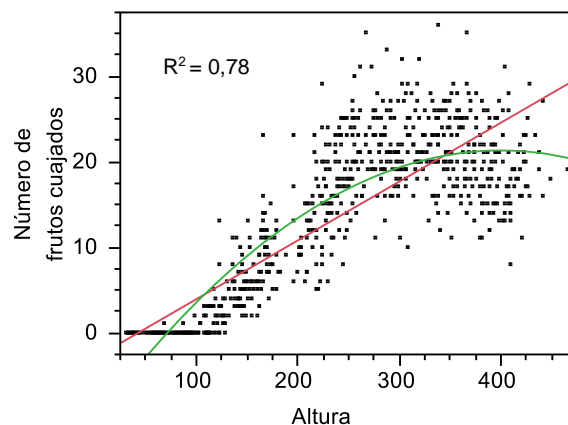
En términos generales el método de control de riego CDI permitió a la planta alcanzar valores más altos en desarrollo y en rendimiento (Figuras 9,12 y 13), por medio del 30% de agotamiento del agua de riego. Las variables correlacionadas en la Figura 6 son vitales en el desarrollo de estructuras reproductivas para un adecuado rendimiento.

El contenido de humedad en el sustrato tiene efectos en las plantas como el cierre estomático, al respecto, Mistura (2013) y Tomalá (2017) mencionan que al suceder este fenómeno se evita la salida del vapor de agua y la entrada de dióxido de carbono. Sin dióxido de carbono, la fotosíntesis se interrumpe dejando la planta

sin azúcares disponibles para el crecimiento y, por lo tanto, este se detiene, por lo que existe una gran correlación entre las variables de crecimiento y la cantidad de hojas que la planta posee, ya que no solo define la cantidad de estomas por medio de los cuales la planta puede transpirar y mantener el flujo transpiracional, sino que también cada hoja una fuente de generación de energía en la planta y lo anterior definirá el crecimiento.

En resumen, a mayor energía existe un mayor crecimiento de las partes de la planta, y viceversa, de ahí la alta correlación entre la variable de altura y formación de hojas.

La relación entre las variables número de frutos cuajados y altura de planta fue alta ( $R^2 = 0,78$ ), lo cual quiere decir que el 78% de los cambios en el número de frutos cuajados, puede ser explicados por medio de cambios en la variable altura de la planta (Fig. 7).



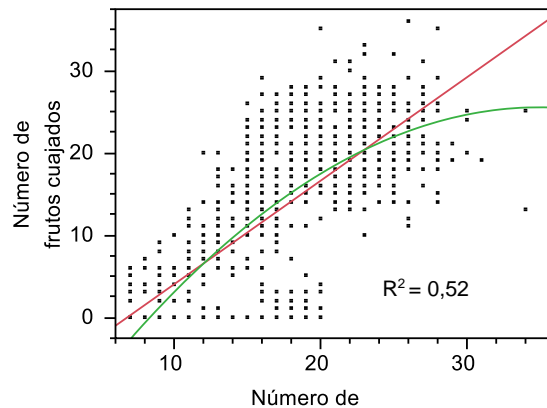
**Figura 7.** Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de frutos cuajados y altura, donde el número de frutos cuajados =  $0,0077985 + 0,0680099 \cdot \text{Altura (cm)} - 0,0001974 \cdot (\text{Altura (cm)})^2$ .

Se utilizó una sola guía de crecimiento para el manejo de la arquitectura de las plantas de tomate, lo cual según exponen Ardila et al. (2012) al dejar una sola guía, la determinación de la altura es más fácil y además existe una alta correlación entre el número de racimos (frutos) y la altura de las mismas, respaldando la información observada en la Figura 7.

Lo anterior coincide con lo determinado por Ho (1989) y Ardila et al. (2012), que explican la relación fuente sumidero en función de la aparición de primordios florales, flores y crecimiento vegetativo ya que, en el tomate, la formación de los primordios florales (etapa previa a floración completa) compite por fotoasimilados con los frutos existentes y los órganos vegetativos en crecimiento. Lo que quiere decir que ante una mayor demanda de fotoasimilados la planta debe redistribuir los mismos y así equilibrar el balance.

Además, desde el punto de vista operativo, el  $R^2$  (0,78) entre las dos variables permite estimar los rendimientos y así optimizar el uso de recursos económicos y humanos, ya que, en vez de medir ambas variables podría medirse únicamente una de ellas.

El ajuste cuadrático con las variables de número de frutos cuajados y número de hojas observado en la Figura 8 es de 0,52 ( $R^2$ ), lo cual es una correlación alta de 52%, lo que quiere decir que el 52% de los cambios en el número de frutos cuajados, puede ser explicados por medio de cambio en el número de hojas de planta.



**Figura 8.** Ajuste lineal y ajuste cuadrático para las variables de número de frutos cuajados y número de hoja, donde: Número de frutos cuajados =  $-8,194959 + 1,3013649 \cdot \text{Número de hojas} - 0,0359796 \cdot (\text{Número de hojas} - 16,9111)^2$ .

El número de hojas mostró una alta relación con el número de frutos cuajados (Fig. 8), lo cual es de vital importancia ya que un mayor número de hojas podría estar relacionado con un mayor índice de área foliar, lo cual respalda los datos obtenidos donde el método CDI mostró una cantidad mayor de hojas (Fig.10), también mostró un mayor índice de área foliar (Fig. 12).

Según Seminario *et al.* (2017), el índice de área foliar es una variable indispensable para entender el crecimiento y la productividad de una especie, ya que, en conjunto con otras variables, permite calcular índices de crecimiento como la tasa absoluta de crecimiento, tasa relativa de crecimiento, tasa de asimilación neta e índice de cosecha.

Lo anterior concuerda con Germ *et al.*, (2007) y Rouhi *et al.*, (2007), que mencionan que ante una menor área foliar, se afectan negativamente otros parámetros como la interceptación y captación de radiación; reduciendo así la fotosíntesis y por consiguiente el rendimiento del cultivo.

La relación entre número de hojas y frutos cuajados (Fig. 8), permite comprender el comportamiento vegetativo generativo de un cultivo, es decir el balance en la relación fuente/sumidero. Según Quintana *et al.* (2010) una mayor disponibilidad de fotoasimilados puede provocar una mayor carga de frutos y una disminución del aborto floral, siempre y cuando la planta esté en condiciones de soportar dicha carga en términos fisiológicos de nutrición. Sin embargo, es importante destacar que, en este trabajo, se refiere a frutos cuajados y no a los que llegan a ser cosechados.

En este caso, la planta podría presentar un comportamiento más generativo, entrar en estrés fisiológico y sufrir una demanda desmedida de fotoasimilados con respecto a la fuente, provocando así un aumento en el aborto de frutos y una disminución de los rendimientos.

### **Caracterización de las etapas del cultivo**

En el Cuadro 5 se presentan las etapas del cultivo en este experimento y su duración (semanas) desde el establecimiento hasta el final de la fructificación para un ciclo de 19 semanas de cultivo.

**Cuadro 5.** Etapas del cultivo determinadas según la medición de parámetros morfofisiológicos para todos los tratamientos.

MES	SDDT	ETAPA
JUNIO	1	ESTABLECIMIENTO
	2	
JULIO	3	DESARROLLO VEGETATIVO Y FLORACIÓN
	4	
	5	
	6	
AGOSTO	7	50% FLORACIÓN
	8	
	9	
	10	
	11	
SEPTIEMBRE	12	FRUCTIFICACIÓN
	13	
	14	
OCTUBRE	15	PICO DE FRUCTIFICACIÓN
	16	
	17	FRUCTIFICACIÓN
	18	
	19	

SDDT: Semanas después de trasplante, L, K, M, J, V, S y D: los días de la semana desde lunes, a domingo, en el mismo orden.

Jaramillo et al (2007) establecieron dos fases para el cultivo del tomate: una vegetativa y otra reproductiva. La primera va desde el trasplante al primer racimo floral con una duración de 30 a 35 días y la etapa productiva se inicia a partir de la formación del botón floral y el llenado de fruto dura aproximadamente 60 días, iniciando la cosecha a los 90 días.

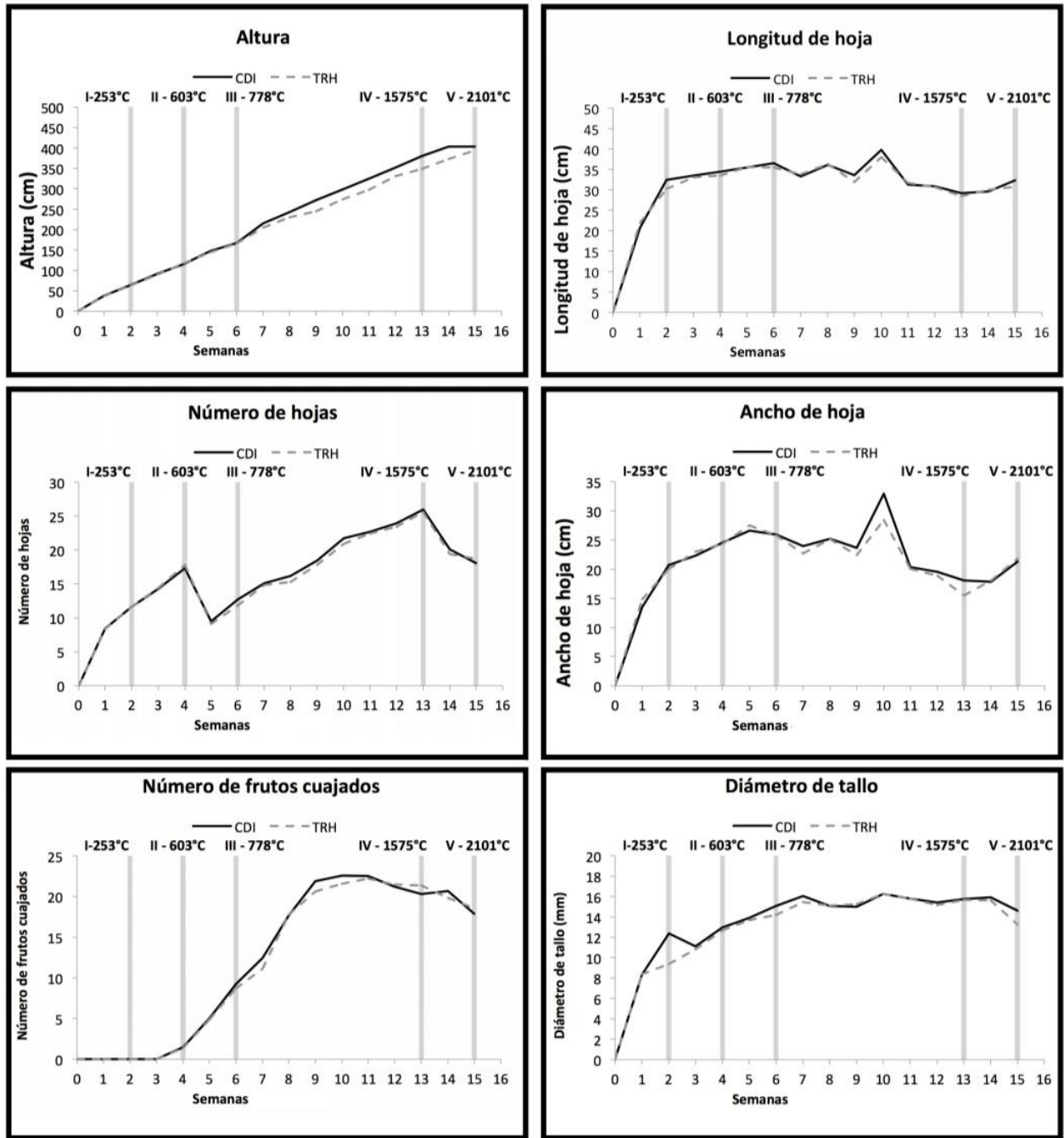
Dicho comportamiento fue coincidente con lo observado en este experimento, donde el cultivo alcanzó los primeros racimos a los 36 días después del trasplante (DDT) y en la fase reproductiva el llenado se alcanzó a los 58 días a partir del inicio de la floración para el primer racimo. La duración al inicio de la cosecha fue diferente a lo observado por Jaramillo et al (2007) ya que en el experimento la cosecha inició aproximadamente a los 100 días, según el estudio anterior inició a los 90 días. Además, dicho autor establece que la fase reproductiva

tiene una duración de 180 días aproximadamente, mientras que en este estudio la cosecha finalizó a los 144 DDT.

### **Variables de crecimiento**

En las variables de altura, longitud de hoja, ancho de hoja, diámetro del tallo, número de hojas y número de frutos cuajados no se observaron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ), en cuanto al porcentaje de agotamiento e interacción se refiere. Sin embargo, se lograron observar diferencias ( $P < 0,05$ ) en el método de control de riego, mostrando valores superiores el método CDI en el desarrollo de las variables mencionadas anteriormente (Fig. 9).

Por otro lado, el efecto de los grados día no fue determinante ya que todos los tratamientos fueron sometidos a la misma cantidad de grados día, y se comportaron de manera uniforme y generalizada. No hubo un adelantamiento de ninguna etapa por parte de ningún tratamiento, en el momento de la cosecha, todos los tratamientos entraron a dicha etapa en la misma semana (Fig. 9).



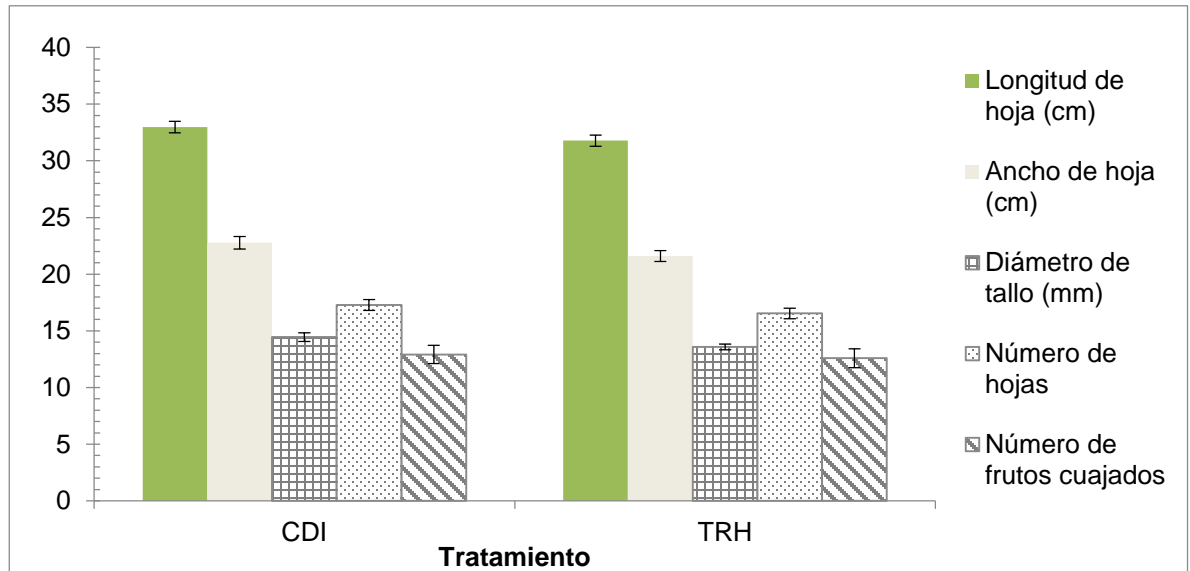
**Figura 9.** Desarrollo de variables morfofisiológicas, según el método de control de riego, el tiempo térmico y las etapas del cultivo. I: Establecimiento; II: Desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: 50% de floración; III: 50% de floración; IV: Inicio de cosecha y V: Pico de cosecha.



La planta obtiene energía de la luz solar, la cual a partir de cierto punto del desarrollo de la planta tiene que ser distribuida según la prioridad de cada órgano en la planta. Marcelis (1994); Bertin (1995) y Heuvelink (1997) mencionan que, al incrementar el número de frutos por planta, el crecimiento de los mismos ocurre a expensas del crecimiento vegetativo.

Sin embargo, existe una contraposición de situaciones ya que el crecimiento vegetativo es necesario para la formación del área foliar, que será la fuente de fotoasimilados para la planta. Ante una alta distribución de carbohidratos hacia las frutas, la capacidad de producción futura se verá afectada, ya que las variables de crecimiento se verán reducidas y por ende la cantidad de fotoasimilados (Quintana et al., 2010).

En la Figura 10 se observa el valor promedio por método de control de riego en diferentes variables de crecimiento, debido a que en el análisis estadístico las mismas mostraron diferencias en el método, pero no en el porcentaje de agotamiento ni en su interacción.



**Figura 10.** Valor promedio del desarrollo de las variables de longitud de hoja, ancho de hoja, diámetro de tallo, número de hojas y número de frutos cuajados en el experimento.

En promedio general del método CDI fue 6% superior al método TRH (Fig. 10) en el desarrollo de variables de crecimiento, al combinar todas las variables.

Comúnmente en la medición de caracteres físicos y de crecimiento de la planta se entiende que al no existir diferencias estadísticas ( $P > 0,05$ ) la planta tiene un comportamiento igual entre tratamientos. El concepto de crecimiento más usado en cuanto a crecimiento es el aumento en tamaño; sin embargo Casierra et al. (2007) mencionan que puede darse el crecimiento de cualquier parte de una planta sin que aumente el tamaño, por medio de una multiplicación del número de células, también puede darse el crecimiento con aumento de tamaño disminuyendo el peso seco, cualquiera de los medios descritos anteriormente consumen energía de manera que el punto clave es el suministro de la misma (Casierra et al., 2007).

## Precisión y exactitud de los métodos de control de riego

El estrés por déficit hídrico afecta a las plantas desde el punto de vista fisiológico, puntualmente en los procesos de fotosíntesis, fotorrespiración y respiración (Munne-Bosch et al., 2009; Kulkarni y Phalke, 2009; Germ et al., 2007).

La distribución del agua es clave en el crecimiento y el método de control de riego con TRH fue menos preciso (Cuadro 6) ya que obtuvo desviaciones estándar mayores al método CDI, exceptuando el método de el caso de 30%, lo cual sugiere que en algunos momentos la planta fue sometido a excesos y a déficit hídrico.

Además, el método de control TRH fue menos exacto (Cuadro 7) a la hora de mantener la humedad volumétrica entre el rango de capacidad de campo (CC) y el punto de relleno (Cuadro 2), además el Cuadro 6 se mostró una desviación estándar mayor para el método TRH, provocando así momentos de exceso de humedad y momentos de sequía dentro del sustrato.

**Cuadro 6.** Prueba de Fisher realizada a la desviación estándar de los niveles 10%, 20% y 30% de agotamiento en los tratamientos CDI y TRH. Donde n: número de muestra; E.E: error estándar. Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico.

Método de control	Porcentaje de agotamiento	Medias	n	E.E.	
CDI	10	4,36	62	0,46	A
TRH	10	6,76	62	0,46	B
CDI	20	4,57	62	0,46	A
TRH	20	6,36	62	0,46	B
CDI	30	7,67	62	0,46	B
TRH	30	7,22	62	0,46	A

**Cuadro 7.** Prueba de Fisher realizada al promedio total de humedad volumétrica obtenido en cada uno de los tratamientos. Donde n: número de muestra; E.E: error estándar. Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico.

Método de control	Porcentaje de agotamiento	Medias	n	E.E.	
CDI	10	60,55	62	0,6	D
TRH	10	65,09	62	0,6	E
CDI	20	53,17	62	0,6	B
TRH	20	58,48	62	0,6	C
CDI	30	51,93	62	0,6	B
TRH	30	46,85	62	0,6	A

Por ejemplo, en el Cuadro 7 se puede observar que el tratamiento TRH 10% obtuvo un promedio total de humedad volumétrica de 65,09 %, lo que quiere decir que la humedad volumétrica se mantuvo en promedio, por encima del rango establecido con la curva in situ (Cuadro 2).

Lo anterior induce respuestas a nivel fisiológico en la planta como lo planteado por (Bray, 1997; Munne-Bosch et al., 2009; Kulkarni y Phalke, 2009; Wang et al., 2003; Macková et al., 2013; Brodrib et al., 2011; Xu et al., 2010) que mencionan que al existir una condición de déficit hídrico, se da una disminución del potencial hídrico en la planta (en las hojas), de manera que aumenta la concentración de ácido abscísico (ABA) y se da el cierre estomático como respuesta temprana para reducir la pérdida de agua por transpiración.

Lo anterior tiene repercusiones en la tasa fotosintética de la planta ya que según (Munne-Bosch et al., 2009; Kulkarni y Phalke, 2009; Germ et al., 2007) también reduce la fijación del CO<sub>2</sub>; materia prima indispensable para la fotosíntesis,

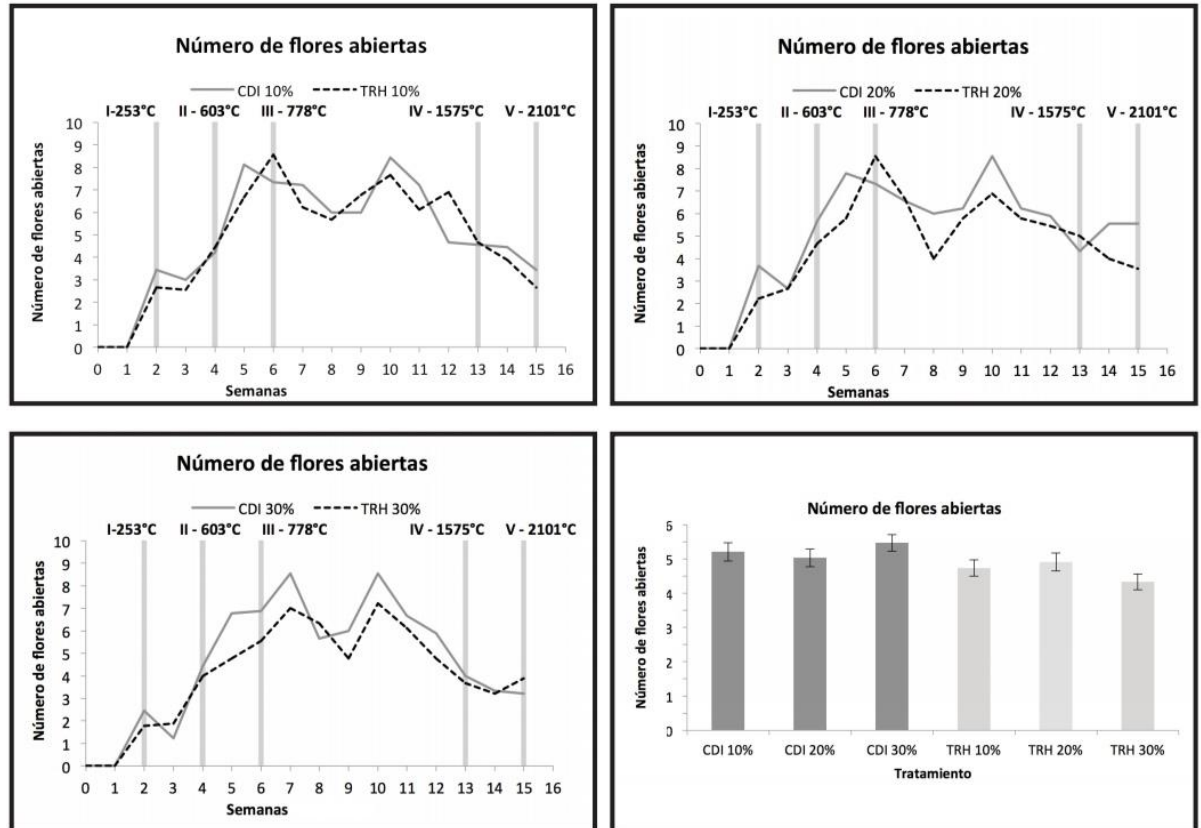
de manera que se reduce la producción de ATP y el crecimiento se reduce; de esta manera se estaría afectando el continuo suelo-planta-atmósfera y así la traslocación de nutrientes y fotoasimilados a las partes en desarrollo. Lo cual se refleja en las Figuras 10, 11, 12 y 13, donde se mostró un crecimiento más reducido en el método TRH.

### **Número de flores abiertas**

La interacción entre el método de control de riego y el porcentaje de agotamiento de la humedad en el sustrato fue significativa ( $P < 0,05$ ) en las variables de número de flores e índice de área foliar. Además, ambos factores (método de control y porcentaje de agotamiento) afectaron ( $P < 0,05$ ) de forma independiente dichas variables. Debido a lo anterior se corrigió el valor de alfa por medio de la prueba de Bonferroni ( $P < 0,017$ ).

La prueba de Bonferroni demostró que el tratamiento con 30% de agotamiento, fue la principal causa de esas diferencias, y el método de control CDI mostró valores de flores abiertas superiores en 11 %, en promedio para todos los porcentajes de agotamiento (Fig. 11).

Haifa (2014) señala que la planta de tomate es relativamente resistente a la sequía, por lo que los porcentajes de humedad volumétrica a los cuales fueron sometidas las plantas, aunque pudieron generar estrés este no fue suficiente para afectar el crecimiento, los cuales fueron similares en todos los niveles de humedad. El método de control con CDI siempre fue superior ya que fue más preciso en la distribución de riego manteniendo a las plantas con un menor nivel de estrés (Cuadros 6 y 7).



**Figura 11.** Número de flores abiertas por tratamiento, en el eje superior se observa la cantidad de grados día acumulados por cada etapa. Donde I: establecimiento; II: desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: pico de floración; IV: fructificación y V: pico de fructificación.

El método TRH con riegos controlados por tiempos fijos mediante un “timer” podría someter a la planta a déficit o exceso de agua (Cuadros 6 y 7) debido a que factores como la edad y la etapa de crecimiento en la que la planta se encuentra difieren en el requerimiento hídrico (Hanson, 1982). Además, los requerimientos incrementan de la germinación hasta el inicio de amarre de frutos, alcanza un pico durante el desarrollo de fruto y decrece durante la madurez, por lo que la programación manual requiere una mayor cantidad de tiempo.

Según Ardila et al. (2011) cuando el suministro de asimilados es deficiente, el crecimiento de un racimo en fructificación puede suprimir la floración de los siguientes racimos, lo cual podría ser la causa de la disminución de la cantidad de flores abiertas a partir de la semana 10, después de iniciar la cosecha (semana 9), donde la demanda de fotoasimilados se regula.

Además, Gallardo et al. (2011) menciona un punto clave, durante la etapa productiva es donde coinciden simultáneamente todos los ciclos de crecimiento, desarrollo vegetativo, floración y el desarrollo y llenado de frutos, generando competencia entre ellos.

El sistema CDI mantuvo la planta mejor irrigada (Cuadros 6 y 7) ya que el punto de arranque del riego se mantuvo mucho más estable (Cuadro 6) lo que favoreció el desarrollo de mayor número de flores (Fig. 10) lo cual podría responder a un favorecimiento del flujo transpiracional de la planta para mantener el continuo suelo-planta-atmósfera y así una mejor distribución de asimilados.

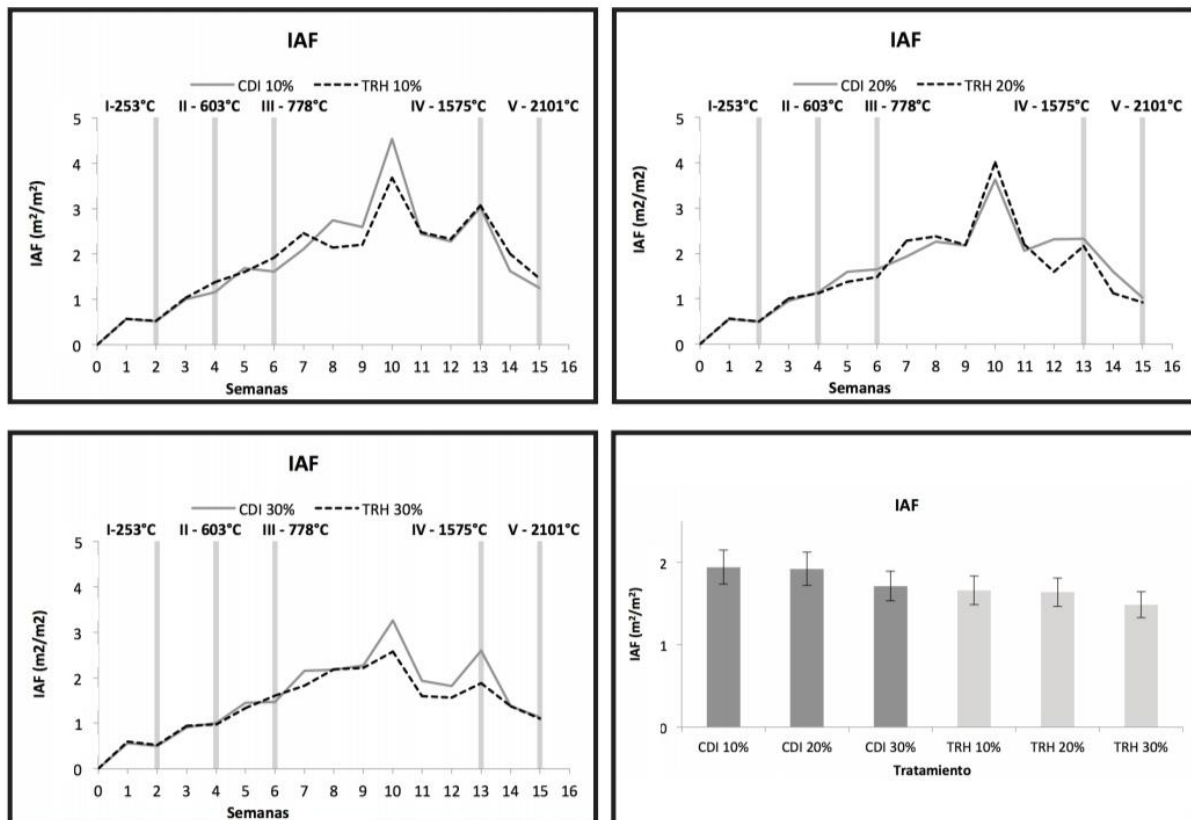
Además si el sistema es más efectivo manteniendo los rangos de riego, es posible que la planta no entre en estrés por déficit y/o exceso de agua, que según mencionan Munne-Bosch et al., (2009); Kulkarni y Phalke (2009); Germ et al. (2007) puede darse por medio del cierre estomático, que aunque permite a la planta mantener el balance hídrico adecuado (evitando transpirar en exceso) reduce la fijación del  $\text{CO}_2$ ; por consiguiente, la fotosíntesis es reducida y de forma paralela, el crecimiento se reduce, por baja producción y acumulación de fotoasimilados, la planta se calienta, entrando en un mayor nivel de estrés.

### **Índice de área foliar (IAF)**

En la figura 12 se presenta el IAF para los distintos tratamientos, en el IAF no hubo tendencias diferentes entre ambos métodos de control al incrementar porcentaje de agotamiento de la humedad en el sustrato desde 10% hasta 30% ( $P < 0,05$ ). Sin embargo, dicha variable fue afectada significativamente ( $P < 0,05$ ) por ambos factores. Contrario a lo encontrado por Pertierra *et al* (2000) donde determinaron que no fue posible encontrar una diferencia significativa en el IAF bajo dos porcentajes de humedad diferentes.

En el IAF, la influencia de los grados día no fue significativa debido a que los distintos tratamientos alcanzaron un desarrollo uniforme en cuanto a crecimiento (Fig. 12) según el tiempo cronológico, comportamiento observado también en todas las variables restantes (Fig. 10). Por ejemplo, para el caso del IAF el pico de desarrollo se dio en la misma semana (semana 10), no hubo adelanto o retraso por parte de ningún tratamiento.





**Figura 12.** Índice de área foliar obtenido por cada tratamiento. Donde I: establecimiento; II: desarrollo vegetativo e inicio de floración; III: pico de floración; IV: fructificación y V: pico de fructificación.

La cantidad y calidad de la radiación solar incidente es crucial para el desarrollo fisiológicos y morfológicos del cultivo, ya que es la fuente de energía de todos los procesos asociados a la fotosíntesis, en la Figura 12 se observa como el método de control CDI obtuvo valores superiores a lo largo de la investigación, con un pico en la semana 10, donde se abrió la brecha de formación de IAF en todos los tratamientos, estabilizándose en la semana 11.

Berkovich et al. (2017) menciona que la longitud de onda del espectro que la planta puede absorber, inducen procesos clave y conducen a reacciones bioquímicas básicas para el funcionamiento y supervivencia de una planta. Por

ejemplo, la fotosíntesis, respiración y un factor vital que es la traslocación de asimilados dentro de la planta, el cual está directamente relacionado con la cantidad de agua disponible en el medio de cultivo, lo cual nuevamente indica que el método que fue menos preciso y exacto (Cuadros 6 y 7) pudo haber limitado la planta en la traslocación de asimilados dentro de la misma.

Independientemente del nivel de agotamiento, el tratamiento CDI obtuvo un desarrollo de IAF mayor que TRH, lo cual podría deberse a que con el método CDI se obtuvo una menor desviación estándar (Cuadro 6), manteniendo mayor estabilidad de la humedad volumétrica (%v/v) en todos los niveles de agotamiento.

Una planta con mayor cantidad de hojas por metro cuadrado debería tener mayor capacidad de producción de fotoasimilados, los cuales, mediante un método eficiente de control de aporte y frecuencia del riego, deberían ser traslocados de una manera uniforme, estable y eficiente dentro de la planta, manteniendo el continuo suelo-planta-atmósfera con un flujo uniforme según la evapotranspiración.

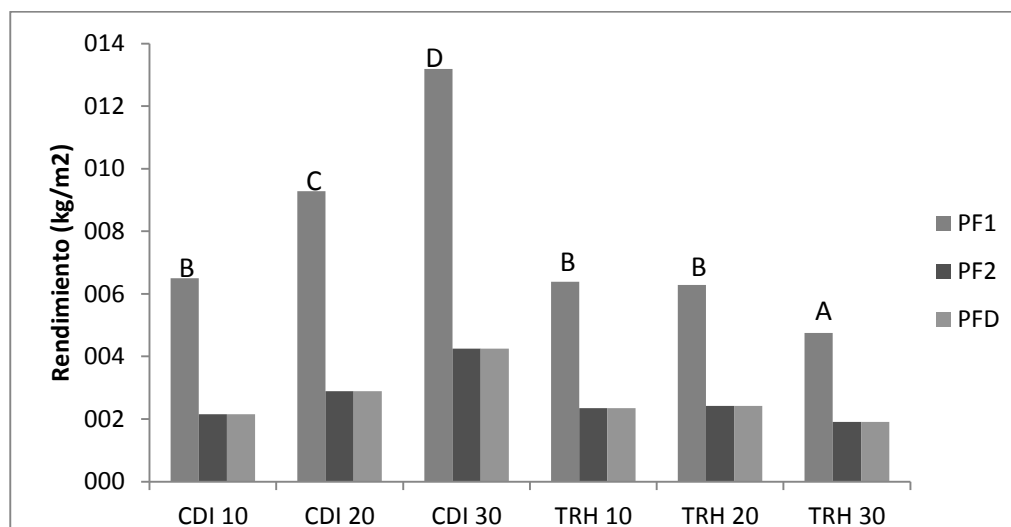
A partir de la semana 4 el IAF, varió debido a las podas realizadas, equilibrando la relación fuente sumidero, favoreciendo el cuajado y el tamaño final de frutos (Dogliotti, 2007).

### **Rendimiento**

En el cuadro 8 se observa la cantidad de kilogramos de fruta por metro cuadrado de tomate, el mejor tratamiento fue CDI 30% que superó en 48% al tratamiento TRH 10%

**Cuadro 8.** Rendimiento en kilogramos por metro cuadrado por cada tratamiento. Donde Primera: 240 g – 190 g; Segunda: 190 g – 140 g; Desecho: 140 g o menos.

Rendimiento (Kg/m <sup>2</sup> )	Tratamiento					
	CDI 10	CDI 20	CDI 30	TRH 10	TRH 20	TRH 30
<b>Primera</b>	6,50	9,29	13,19	6,38	6,29	4,76
<b>Segunda</b>	2,15	2,89	4,25	2,35	2,42	1,90
<b>Desecho</b>	1,48	2,62	2,63	1,78	1,56	1,28



**Figura 13.** Rendimiento fresco total por tratamiento según categoría de primera (PF1): segunda (PF2), desecho (PFD). Las letras diferentes indican el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico.

Casierra et al. (2007) mencionan que el rendimiento está determinado por la capacidad del cultivo para acumular materia seca en los órganos destinados a la cosecha, que representan el principal sumidero. El fruto de tomate está compuesto por un porcentaje alto de humedad, que es cerca del 90% (Monsalve y Machado,

2007) y la reserva de agua fácilmente disponible para la planta, es clave para un correcto llenado de frutos.

Bates et al. (2008) mencionan que la cantidad de agua disponible para el llenado está interrelacionada con otros factores como la evaporación y la temperatura, por lo que en momentos de mayor estrés por temperatura gracias a la radiación fotosintéticamente activa (Fig. 2) la planta podría entrar en un proceso de gasto energético manteniendo la temperatura de la planta por medio de transpiración, en detrimento del llenado de frutos, disminuyendo su calidad. Lo cual podría explicar la razón por la cual los tratamientos TRH obtuvieron rendimientos menores (Fig. 13).

La relación fuente-sumidero es de vital importancia, ya que los frutos son el principal órgano sumidero de fotoasimilados. El fruto en su estado inicial acumula cantidades escasas de materia seca, pero considerando el valor acumulado, se ha observado este valor es alto (Casierra et al, 2007) de manera que la reducción notable en el rendimiento de hasta un 50% para el método TRH podría deberse una distribución desuniforme de asimilados y agua, reduciendo la cantidad de frutos de primera hasta en un 6% y aumentando la cantidad de rechazo en hasta en un 4% (Cuadro 8).

El transporte de fotoasimilados a los frutos es crucial, por lo que la función del índice de área foliar también es trascendental, como se observa en la Figura 12 el índice de área foliar en los tratamientos controlados por el método CDI fue superior en todos los casos, lo cual sugiere que el suplemento de fotoasimilados también fue superior lo cual favoreció el llenado de frutos y una capacidad mayor

de la planta de soportar una mayor carga de frutos sin generar abortos ni abscisión, obteniendo mayor cantidad de flores abiertas (Fig. 11) y frutos cuajados (Fig. 9).

El rendimiento en el tratamiento CDI 30 fue 51% superior a CDI 10%, mientras que CDI 30 fue un 30% superior al tratamiento CDI 20 en términos de kilogramos de tomate de primera calidad por metro cuadrado (Cuadro 8). El mayor rendimiento con control CDI se obtuvo con 30% de agotamiento, el cual fue 48% superior que el mejor tratamiento con control TRH (TRH10%).

Haifa (2014) menciona que cualquier estrés de agua, aunque sea leve, afecta directamente el tamaño del fruto y su maduración, razón por la cual se observó un rendimiento menor cuando el cultivo se manejó con el método TRH, ya que el mismo expuso al cultivo a un régimen hídrico desuniforme e impreciso (Cuadro 6), aunado a lo anterior menciona que un riego tardío o demasiado extenso cercano a la cosecha puede provocar una disminución de la misma, además puede ser dispareja e inducir el enraizado, lo cual se observó visualmente en los tratamientos controlados por el método TRH y además se vio reflejado en la caracterización de la cosecha por calidades (Cuadro 8) donde el método TRH obtuvo en promedio una proporción de 60% de primera, 22% de segunda y 17% de rechazo, pero siendo 4% más bajo que el método CDI.

El tratamiento TRH30% tuvo el rendimiento más bajo, ya que mantuvo una humedad volumétrica total muy baja de 46,85% (Cuadro 7), sometiendo a la planta a condiciones de déficit hídrico, que afecta directamente el llenado de frutos.

Aunado a lo anterior, el método con control CDI fue capaz de mantener los rangos de humedad mucho más estables, con una desviación estándar menor (Cuadro 6 y 7) y un contenido de humedad cercana al valor establecido en la curva

In situ (Cuadro 2). evitando así estrés por déficit o exceso de agua en el sustrato, y favoreciendo un mejor desarrollo de hojas y el consecuente mejor llenado de frutos. Casierra et al. (2007) mencionan que el manejo del factor hídrico durante las etapas de producción del cultivo, es fundamental para un óptimo rendimiento.

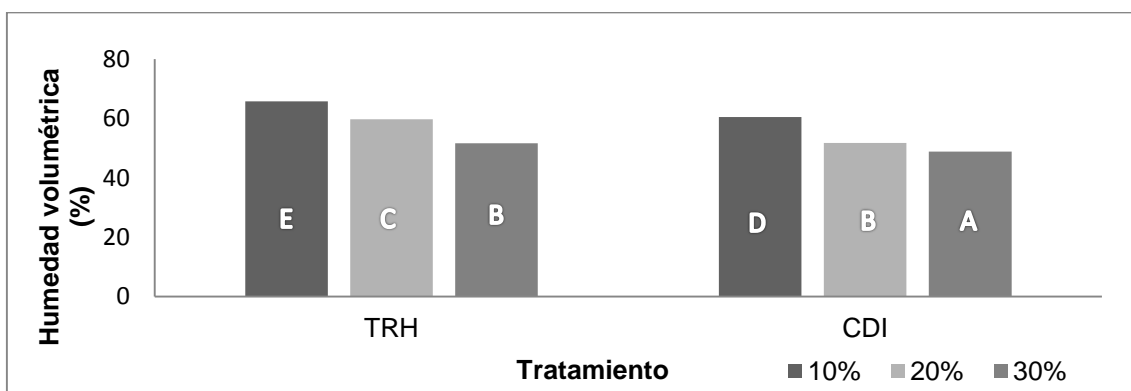
Un factor trascendental es el componente de rendimiento referido al peso promedio del fruto, ya que está fuertemente influenciado por el nivel de humedad disponible para la planta. Así mismo Casierra et al. (2007) mencionan que el estudio del desarrollo y la evolución del crecimiento según la humedad disponible para la planta y la zona de estudio, sirven para estimar el peso que tendrá el fruto a cosecha.

El tratamiento CDI 30% obtuvo el mayor rendimiento total, de primera y segunda calidad de frutos y el menor rechazo, alcanzando un 65%, 22% y 13% de primera, segunda y rechazo, respectivamente. Por otra parte, el tratamiento con rendimiento más bajo se alcanzó 59% de primera, 23% de segunda y 16% de rechazo (Cuadro 6).

En investigaciones realizadas por Germ et al. (2007) y Rouhi et al., (2007), que demostraron que una menor área foliar, disminuye la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada reduciendo tanto la fotosíntesis y como el rendimiento, debido a una menor producción de energía por parte de la planta, concordando con los resultados observados en la Figura 12 de índice área foliar y el Cuadro 8 de rendimiento.

Al observar el método de control de riego CDI se aprecia una diferencia significativa ( $P < 0,005$ ) en el rendimiento con respecto al método TRH (Fig. 13); en el caso del método CDI conforme aumentó el porcentaje de agotamiento también

aumento el rendimiento. Caso opuesto sucedió en el método TRH donde, además de ser más bajos los rendimientos, conforme aumentó el porcentaje de agotamiento disminuyó el rendimiento. Lo anterior podría deberse a lo descrito anteriormente sobre la imprecisión del método TRH (Cuadros 6 y 7) aunado a esto se observó una variación en el punto de arranque de las bombas que controlaron dicho tratamiento (Fig. 14) lo cual pudo contribuir a incurrir en la imprecisión del método TRH.



**Figura 14.** Puntos de reinicio de la bomba para regar hasta la humedad volumétrica correspondiente a capacidad de campo (punto de arranque) obtenidos por cada método de control del riego en cada nivel de humedad durante el experimento. Las letras diferentes indica el grupo de datos al cual pertenece el tratamiento según el análisis estadístico.

En un estudio realizado por Soto (2018), basado en los estudios de Chen et al. (2013) y Kuşçu et al. (2014), resalta que, en etapa reproductiva, las plantas son más susceptibles a la falta o exceso de agua, y esta susceptibilidad a la cantidad de agua fácilmente disponible para la planta puede influir directa y cuantitativamente en el rendimiento del cultivo (Fig. 13) y/o cualitativamente en los parámetros de calidad del fruto (Cuadro 8). El sistema TRH fue deficiente en mantener los niveles de humedad (Cuadros 6 y 7) dentro del rango adecuado establecidos en la curva In Situ (Cuadro 2).

En el estudio realizado por López et al. (2009) se obtuvieron rendimientos de frutos de 51, 57 y 60 t ha<sup>-1</sup> al aumentar el índice de estrés hídrico, lo que quiere decir que las plantas de tomate pueden soportar un déficit leve de agua y aun así producir adecuadamente. Los autores reportaron que las propiedades organolépticas como el sabor y aroma se alteraron por el riego, pero se obtuvo una mejora en la proporción de sacarosa.

Independientemente del nivel de humedad, los tratamientos con el método de control CDI desarrollaron un IAF más alto (Fig. 12), y mayores rendimientos (Cuadro 6). Esto probablemente fue debido a la relación número de hojas/fruto. Al respecto, Casierra *et al.* (2007) indicaron que la mayoría de la materia seca de los frutos del tomate proviene de los fotoasimilados producidos en las hojas adyacentes, así que es posible pensar que entre mayor sea la relación, el fruto tendrá una mejor oferta de fotosimilados para su desarrollo. Según Chamarro (1995) en una planta con varios racimos de frutos (que es caso del experimento actual), el suministro de asimilados de las hojas a los racimos procede fundamentalmente de las tres inferiores, ratificando la explicación anterior.

La mayor precisión del método de control de riego CDI (Cuadro 6) fue un factor clave para aumentar la eficiencia del sistema. Diferentes estudios han demostrado que, en la etapa productiva de tomate, el manejo de niveles de agotamiento y riego controlado, sin afectar el estado hídrico de la planta, contribuyó a incrementar hasta un 42% la eficiencia de uso de agua sin afectar el rendimiento y la calidad de frutos. Esto evidencia la importancia de maximizar los recursos para obtener beneficios. Por ejemplo, de Ferreyra *et al.* (2005) demostraron que en el



cultivo a campo abierto puede requerir de 6.000 m<sup>3</sup> de agua por hectárea y en invernaderos hasta 10.000 m<sup>3</sup> por hectárea.

## Conclusiones

- El porcentaje de agotamiento del agua (10%, 20% y 30%) junto con el tiempo térmico no tuvieron un efecto crítico en la caracterización de las etapas vegetativas del cultivo de tomate, ya que en términos generales el cambio de etapa fue igual para todos los tratamientos y el desarrollo de variables fue uniforme.
- El efecto del régimen hídrico sobre la morfofisiología del cultivo tiene un efecto preponderante potenciando o limitando el crecimiento y productividad del mismo, según la capacidad del sistema de mantener un porcentaje de humedad volumétrica constante, estable y preciso en el sustrato
- El rendimiento (etapa reproductiva) del cultivo está limitado a la eficiencia del sistema de riego para mantener la humedad en el sustrato, tanto en la cantidad como la calidad de frutos producidos, aumentando hasta en un 50% la cantidad total de cosecha de un método a otro. Limitando también la calidad del fruto, ya sea disminuyendo la cantidad de frutos de primera como aumento la cantidad de rechazo.

### Literatura citada

- Agüero, SN; Ojeda, E; Giraldez, A; Galleguillo, N; Berbieri, G; Zeman, E; Tolosa, G; Villegas, JA; Costa, MC; Martin, GO. 2009. Acumulación de grados día entre siembra y cosecha y rendimiento granífero obtenido, en cereales invernales. Ulloa, EL; Rodríguez, JA (eds). Argentina, Universidad nacional de Tucumán.
- Alarcón, A. 2013. Calidad poscosecha del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en sistemas ecológicos de fertilización. Tesis Ph.D. España, Universidad Politécnica Madrid. 201 p.
- Almanguer, P; Rodriguez, H; Vidales, JA; Valdez, RD; Aranda, J; Barrientos, L; Rodriguez, JC. 2011. Estimación de grados-día necesarios para producción comercial de nopal verdura (*Opuntia ficus- indica* L.). Revista Salud Pública y Nutrición (5):261-264.
- Ardila, G; Fischer, G; Balaguera, HE. 2012. Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tiempo fisiológico bajo invernadero. Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas 5(1):44-56.
- Armenta, A; Baca, G; Alcántar, G; Kohashi, J; Valenzuela, J; Martínez, A. 2001. Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. Revista Chapingo (Serie Horticultura) 7(1):61-75.

- Arnell, NW. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ Chang* 14:1-52.
- AZUD. 2018. Soluciones de riego. Consultado 20 set. 2018. Disponible en [http://www.azud.com/Imagenes/Descargas/201854111356AZUD\\_SOLUCIONES\\_RIEGO%20ENG\\_ESP%202018.pdf](http://www.azud.com/Imagenes/Descargas/201854111356AZUD_SOLUCIONES_RIEGO%20ENG_ESP%202018.pdf)
- Bates, BC; Kundzewicz, ZW; Wu, S; Palutikof, JP (eds.). 2008. El Cambio Climático y el Agua. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 224 p.
- Beltrano, J; Giménez, D (cords). 2015. Cultivo en hidroponía (en línea). La Plata, Argentina, Universidad Nacional de La Plata. Consultado 19 set. 2018. Disponible en [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Berkovich, Y; Konovalova, I; Smolyanina, S; Erokhin, A; Avercheva, O; Bassarskaya, E; Kochetova, G; Zhigalova, T; Yakovleva, O; Tarakanov, I. 2017. LED crop illumination inside space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration* 6:11-24.
- Bertin, N. 1995. Competition for assimilates and fruit position affect fruit set in indeterminate greenhouse tomato. *Annals of Botany* 75:55-65.
- Bertsch, F. 2006. El recurso tierra en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(1):133-156.

- Bray, EA. 1997. Plant response to water deficit. *Trends in Plant Science* 2(2):48-53.
- Brodribb, TJ; McAdam S. 2011. Passive origins of stomatal control in vascular plants. *Science* 331(6017): 582-585.
- Casierra, F; Cardozo, M; Cárdenas, J. 2007. Growth analysis of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivated in greenhouse. *Agronomía Colombiana*, 25(6):300-305.
- Castilla, N. (2007). *Invernaderos de plástico tecnología y manejo*. Madrid, España, Mundi-Prensa. 462 p.
- Chamarro, J. 1995. Anatomía y fisiología de la planta. In: F. Nuez. ed. *El cultivo de tomate*. Madrid, Mundi-Prensa. 43-91 p.
- Chen, J; Kang, S; Du, T; Qiu, R; Guo, P; Chen, R. 2013. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural Water Management* 129:152-162.
- Dawson, G. 2009. *Interpretación fácil de la bioestadística: La conexión entre la evidencia y las decisiones médicas*. Barcelona, España, Elsevier Health Sciences. 208 p.
- Deeba, F; Pandey, AK; Ranjan, S; Mishra, A; Singh, R; Sharma, YK; Shirke, PA; Pandey, V. 2012. Physiological and proteomic responses of cotton (*Gossypium herbaceum* L.) to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 53:6-18.

Dogliotti, S. 2007. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.): Material de apoyo al Módulo Horticultura. Uruguay, Universidad de la República. Consultado 13 oct. 2018. Disponible en [www.fagro.edu.uy/~cultivos/hortalizas/Repartido\\_Fisiologia\\_tomate.pdf](http://www.fagro.edu.uy/~cultivos/hortalizas/Repartido_Fisiologia_tomate.pdf); consultada: enero de 2010

Duarte, C; Ajete, M; Gonzáles, F; Pérez, C; Sierra, L. 2010. Dosificación de fertilizante para el fertirriego del tomate protegido en Ciego de Ávila. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 19(3):12-16.

Escobar, H; Lee, R. 2009. Manual de producción de tomate bajo invernadero.

Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 180 p.

Estado de la Nación. 2003. Décimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica.

Elein, A; Rodríguez, A; Ruiz, J; Carrillo, Y; Morales, H. 2017. Agronomic tomato crop response to bioproduct QuitoMax®. Ministerio de Educación Superior. Cuba Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Cultivos Tropicales 38(1):147-154.

FAO (Food and agriculture organization of the united nations). 2003. El impacto real del agua virtual sobre el ahorro de agua. Porque la productividad del agua es importante para el desafío global del agua. Roma, España. Consultado 17 oct. 2018. Disponible

FAO (Food and agriculture organization of the united nations). 2011. Rendimiento y área de Tomate sembrado en Costa Rica (en línea). Consultado 17 oct. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.

FAO (Food and agriculture organization of the united nations). 2013. The State of Food and Agriculture. 2013. Consultado 16 oct. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/018/i3300e/i3300e00.htm>

Foladori, G. 2002. Avances y límites de la sustentabilidad social. Economía sociedad y territorio 3(12):621-637.

Gallardo, M; Soto, F; Giménez, C; Martínez-Gaitán, C; Thompson, RB. 2011. Simulación de la productividad y dinámica del agua y N en cultivo de pimiento bajo invernadero con EU-ROTATE\_N. Avances en nuevas estrategias de fertilización 56:17-22.

Galloway, JN; Dentener, FJ; Capone, DG; Boyer, EW; Howarth, RW; Seitzinger, SP; Asner, GP; Cleveland, CC; Green, PA; Holland, EA; Karl, DM; Michaels, AF; Porter, JH; Townsend, AR; Voromarty, C. 2004. Nitrogen cycles: Past, present and future. Biogeochemistry 70 (2):153-226

Garabatos, M. 1991. Temas de Agrometeorología. Buenos Aires, Argentina, Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica. 209 p.

Gardner, FP; Pearce, RB; Mitchel, RL. 1985. Physiology of crop plants. Illinois, Estados Unidos, Iowa State University Press.

- Gautier H., Guichard S., Tchamitchian M. (2001). Modulation of competition between fruits and leaves by flower pruning and water logging, and consequences on tomato leaf and fruit growth. *Ann. Bot* 88: 645–652. 10.1006/anbo.2001.1518
- Germ, M; Kreft, I; Stibilj, V; Urbanc-Bericic, O. 2007. Combined effects of selenium and drought on photosynthesis and mitochondrial respiration in potato. *Plant Physiology and Biochemistry* 45(2):162-167.
- Gil-Vázquez, I; Sánchez del Castillo, F & Miranda-Velázquez, I. (2003). Producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero. Serie de publicaciones Agribot, Chapingo, México. 90 p.
- Ghobadi, M; Taherabadi, S; Ghobadi, ME; Mohammadi, GR; Jalali-Honarmand, S. 2013. Antioxidant capacity, photosynthetic characteristics and water relations of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in response to drought stress. *Industrial Crops and Products* 50:29-38.
- Hanson A; Hitz W. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Ann. Rev. Plant physiol.* 33: 163-203.
- Haifa. 2014. Recomendaciones nutricionales para tomate en campo abierto, acolchado o túnel de invernadero (en línea). Consultado 25 set. 2018. Disponible en [http://www.haifagroup.com/spanish/files/Languages/Spanish/Tomate\\_2014.pdf](http://www.haifagroup.com/spanish/files/Languages/Spanish/Tomate_2014.pdf).



- Heuvelink E. 1997. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato. *Scientia Horticulturae* 69(1-2):51-59.
- Hitzand, S; Smith, J. 2004. Estimating global impacts from climate change. *Global Environ change* 14(3):201-218.
- Ho, LC. 1989. Environmental effects on the diurnal accumulation of  $^{45}\text{Ca}$  by young fruit and leaves of tomato plants. *Ann. Bot* 63: 281–288.
- Hoking, PJ; Steer, BT. 1994. The distribution and identity of assimilates in tomato with special reference to stem reserves. *Annals of Botany* 73(3):315-325.
- Hoyos, D; Morales, JG; Chavarría, H; Montoya, AP; Correa, G; Jaramillo, SC. 2012. Acumulación de grados-día en un cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en un modelo de producción aeropónico (en línea). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 65(1):6389-6398. Citado 5 oct. 2018. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/30765>
- Huertas, CL. 2018. Validación de la Canaleta de Demanda Inteligente como control de riego utilizando sondas capacitivas, en Tomate (*Solanum lycopersicum*) var. Gladiador en sistema hidropónico bajo invernadero. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

- INCYTU (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión). 2018. Agricultura de Precisión. Coyoacán, México. 15: 1-6 p. Consultado 28 oct. 2018. Disponible en [https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU\\_18-015.pdf](https://www.foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_18-015.pdf)
- Imas, P. 1999. Manejo de Nutrientes por Fertirriego en Sistemas Frutihortícolas. Intenational Potash Institute. Tucuman, Argentina.
- Jaramillo, J; Rodriguez, V; Guzman, M; Zapata, M; Rengifo, T. 2007. Technical manual: Good Agricultural Practices in the Production of tomato under protected conditions. FAO.
- Kulkarni, M; Phalke, S. 2009. Evaluating variability of root size system and its constitutive traits in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) under water stress. *Scientia Horticulturae* 120(2):159-166.
- Kuşçu, H; Turhan, A; Demir, A. 2014. The response of processing tomato to deficit irrigation at various phenological stages in a sub-humid environment. *Agricultural Water Management* 133:92-103.
- Liu, F; Stutzel, H. 2004. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae* 102(1):15-27.

López, L. 2012. Actualidad de la agrocadena del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). Segundo Congreso Nacional del Cultivo de Tomate (2012, Pérez Zeledón, Costa Rica). San José, Costa Rica, MAG. p.1-3.

López, L. 2016. Rendición de cuentas de la agrocadena de tomate (Power point).

Programa Nacional Sectorial de tomate. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 16 p.

López, L; Quirós, Y. 2016. Estadísticas de áreas de siembra y rendimientos por región para tomate período 2015-2016. Comisión estadística de tomate. San José, Costa Rica. MAG. 9 p.

López, R; Arteaga, R; Vázquez, MA; López, I; Sánchez, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas (en línea). Agricultura técnica en México 35(1):97-111. Consultado 29 oct. 2018. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&tlng=es)

López-López, R; Sánchez, I; Inzunzalbarra, MA; Fierro, A; Esquivel, G. 2014. Increasing Water Use Efficiency in Husk Tomato (*Physalis ixocarpa* Brot) Production in Tabasco, Mexico with Improved Irrigation Water Management. Journal of Water Resource and Protection (6):1248-1258.

- Macková, J; Vasková, M; Macek, P; Hronková, M; Schreiber, L; Santrucek, J. 2013. Plant response to drought stress simulated by ABA application: Changes in chemical composition of cuticular waxes. *Environmental and Experimental Botany* 86:70-75.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2007. Agrocadena regional del cultivo de chile dulce (en línea). Alajuela, Costa Rica. 22 p. Consultado 23 may. 2018. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00069.pdf>
- Marcelis, LF. 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74:43-52.
- Moreno, LP. 2009. Respuesta de las plantas a estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Revista Agronomía Colombiana* 27(2):179-191.
- Monsalve, J y Machado, M. 2007. Evaluación de dos métodos de deshidratación del tomate (*Lycopersicon esculentum* mill) variedad manzano. *Multiciencias*. Vol. 7. Nº 3 (256 - 265)
- Munné-Bosch, S; Falara, V; Pateraki, I; López-Carbonell, M; Cela, J; Kanellis, AK. 2009. Physiological and molecular responses of the isoprenoid biosynthetic pathway in a drought-resistant Mediterranean shrub, *Cistus creticus* exposed to water deficit. *Journal of Plant Physiology* 166(2):136-145.
- Oki, T; Kanae, S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790):1068-1072.

- Onder, S; Caliskan, ME; Onder, D; Caliskan, S. 2005. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components. *Agricultural Water Manage* 73(1):73-86.
- Pertierra, R; Jara, J; Suárez, M; Celis, J; Reyes, F. 2000. Tomate (*Lycopersicon Esculetum* Mill.) cultivado en invernadero bajo dos regimenes hídricos: Flujo de savia, crecimiento y rendimiento. *Ciencia e Investigación Agraria*, 27(3):161-168. DOI: 10.7764/rcia.v27i3.1073
- Pierantozzi, P; Torres, M; Bodoira, R; Maestri, D. 2013. Water relations, biochemical-physiological and yield responses of olive trees (*Olea europaea* L. cvs. Arbequina and Manzanilla) under drought stress during the pre-flowering and flowering period. *Agricultural Water Manage* 125:13-25.
- Del Pino, M; Gamboa, S; Vignasse, MS. 2012. Diagnóstico de situación de cultivos hortícolas: experiencia didáctica tipo "taller" (En línea). IV Congreso Nacional y III Congreso Internacional de Enseñanza de las Ciencias Agropecuarias (2012, La Plata, Argentina). La Plata, Argentina, Universidad Nacional de La Plata. p. 655-666 Consultado 15 abr. 2018. Disponible en: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21863/Documento\\_completo.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/21863/Documento_completo.pdf?sequence=1)
- Qadir, G; Ahmad, S; Hassan, F; Cheema, MA. 2006. Oil and fatty acid accumulation in sunflower as influenced by temperature variation. *Pakistan Journal of Botany* 38(4):1137-1147.

- Quintana, H; Balaguera, J; Cárdenas, J. 2010. The effect of number of clusters per plant on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 4(2):199-208.
- Ramírez, C; Nienhuis, J. 2012. Cultivo protegido de hortalizas en Costa Rica (en línea). *Revista Tecnología en Marcha* 25(2):10-20. Consultado en 9 jun. 2018. Disponible en: [http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/303](http://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/303)
- Rodríguez, L. 2015. Caracterización de la respuesta fisiológica de tres variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo condiciones de estrés por déficit hídrico. Tesis Ph.D. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 163 p.
- Rodríguez, W; Leihner, YD. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. In: Villalobos, D. *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales*. San José, CRC, Editorial Universidad de Costa Rica. p.1-37.
- Romero, F; Martínez, M; Pretel, M. 2007. Factores precosecha determinantes de la calidad y conservación en poscosecha de productos agrarios (en línea). España. p. 91-96. Consultado 17 oct. 2017. Disponible en <http://www.horticom.com/pd/imagenes/65/906/65906.pdf>
- Rosegrant, MW; Jawoo Koo; Cenacchi, N; Ringler, C; Robertson, RD; Fisher, M; Cox, C; Garrett, K; Perez, ND; Sabbagh, P. 2014. Food security in a world of natural resource scarcity: the role of agricultural technologies (en línea).

IFPRI (International Food Policy Research Institute). Washington, Estados Unidos. Consultado 19 mar. 2018. Disponible en <http://dx.doi.org/10.2499/9780896298477>

Rosenzweig, C; Strzepek, K; Major, D; Iglesias, A; Yates, D; Mccluskey, A; Hillel, D. 2004. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. *Global Environ* 14(4):345-360.

Rouhi V, Samson R, Lemeur R, Van Damme P, 2007. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. *Environ Exp Bot* 59: 117-129.

Sandri, MA; Andriolo, JL; Witter, M; Dal Ross, T. 2003. Effect of shading on tomato plants grow under greenhouse. *Horticultura Brasileira* 21(4):642-645.

SAS Institute Inc. 2014. Using JMP 11. Carolina del Norte, Estados Unidos.

Seminario, J; Oblitas, I; Escalante, B. 2017. Área foliar del yacón (*Smallanthus sonchifolius* (Poep. & Endl.) H. Rob.). estimada mediante método indirecto1 (en línea). *Agronomía Mesoamericana*. 28 (1): 171-181. Consultado 10 ago. 2018. Disponible en <http://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v28n1/43748637013.pdf>

- Shingleton, A. 2010. Allometry: the study of biological scaling (en línea). Nature Education Knowledge 3(10):2. Consultado 6 ago. 2018. Disponible en <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/allometry-the-study-of-biological-scaling-13228439>
- Silva, E; Ribeiro, R; Ferreira-Silva, S; Vieira, S; Ponte, L; Silveira, J. 2012. Coordinate changes in photosynthesis, sugar accumulation and antioxidative enzymes improve the performance of *Jatropha curcas* plants under drought stress. Biomass and bioenergy 45:270-279.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero (en línea). Agronomía Costarricense 42(2):59-73. Consultado 23 sep. 2018 Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/33779/33211>
- Tanaka, A; Fujita, K. 1974. Nutrio-physiological studies on the tomato plant. IV Source-sink relationship and structure of the source-sink unit. Soil Science and Plant Nutrition 20(3):305-315.
- Thompson, RB; Martínez-Gaitán, C; Gallardo, M; Giménez, C; Fernández, MD. 2007. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. Agricultural Water Management 89(3):261-274.
- Tilman, D; Cassman, KG; Matson, PA; Naylor, R; Polasky, S. 2002. Agriculture sustainability and intensive production practices. Nature 418(6898):671-677.



Wang, W; Vinocur, B; Altman, A. 2003. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta* 218(1):1-14.

Xu, Z; Zhou, G; Shimizu, H. 2010. Plant responses to drought and rewatering. *Plant Signaling & Behavior* 5(6):649-654.

Zollinger, N; Kjelgren, R; Cerny-Koenig, T; Kopp, K; Kening, R. 2006. Drought responses of six ornamental herbaceous perennials. *Scientia Horticulturae* 109(3)267–274.