

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Fisiología Y Rendimiento De Tomate Cultivado En Un Sistemas Hidropónico NFT  
En Carrete Bajo Condiciones De Invernadero

Por:

**AMAIRANI ANTONIO HERNÁNDEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Fisiología Y Rendimiento De Tomate Cultivado En Un Sistemas Hidropónico NFT  
En Carrete Bajo Condiciones De Invernadero

Por:

**AMAIRANI ANTONIO HERNÁNDEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

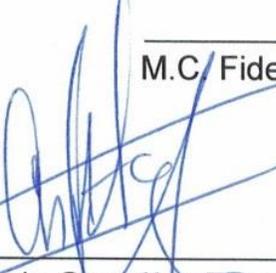
Aprobado por el Comité de Asesoría:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio González Fuentes  
Asesor Principal Interno

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Carmen Alicia Ayala Contreras  
Asesor Principal Externo

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Alfredo Hernández Maruri  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos  
Coasesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Antonio González Fuentes  
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.



Junio, 2022

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Vicente Antonio Bautista y Concepción Hernández Cruz.

A mi hermana, Beatriz Antonio Hernandez.

A mi Alma Mater.

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a Dios, por estar conmigo en todo momento.

A mis padres y mi hermana Beatriz, porque sin su apoyo, esto no sería posible.

A Juan Uriel y su familia.

A la universidad, por recibirme con las puertas abiertas y ser parte de mi formación académica.

Al Dr. José Antonio Gonzales Fuentes, por aceptarme en este gran proyecto; al Dr. José Alfredo Hernández Maruri y al M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos por brindarme su apoyo, en especial a la M.C. Carmen Alicia Ayala Contreras, por su tiempo y así finalizar esta investigación.

A todos mis profesores, al Departamento de Horticultura y todos aquellos que lo conforman, ya que siempre conté con su apoyo y disposición, en especial a Don Gerónimo y Casilla.

A mis amigos Teo, Joel, Lorenzo, Juanita, Adiel, Álvaro, Alexis y Leonor por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A todos mis compañeros de la universidad.

## ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL DEL CONTENIDO .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
RESUMEN .....	XI
I.- INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.- Objetivos.....	3
1.1.2.- General.....	3
1.1.3.- Específico .....	3
1.2.- Hipótesis .....	3
II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
1.1.- Origen e historia .....	4
1.2.- Clasificación taxonómica .....	4
1.3.- Hábitos de crecimiento .....	5
1.3.2.- Determinado.....	5
1.3.3.- Semideterminado .....	5
1.3.4.- Indeterminado .....	6
1.4.- Descripción de la planta .....	6
1.4.2.- Raíz .....	6
1.4.3.- Tallo.....	6

1.4.4.- Hoja .....	7
1.4.5.- Inflorescencia .....	7
1.4.6.- Flor .....	8
1.4.7.- Fruto .....	8
1.4.8.- Semilla.....	9
1.5.- Agricultura protegida.....	9
1.6.- Producción de tomate bajo invernadero .....	10
1.7.- Características deseables del invernadero .....	10
1.8.- Necesidades climáticas .....	11
1.8.2.- Temperaturas óptimas.....	11
1.8.3.- Humedad Relativa (HR) .....	12
1.8.4.- Ventilación.....	12
1.8.5.- Luz.....	13
1.9.- Hidroponía .....	13
1.10.- Sustratos .....	14
1.10.2.- Ventajas .....	15
1.10.3.- Desventajas.....	15
1.11.- Nutrient Film Technique (NFT) .....	15
1.11.2.- Ventajas .....	15
1.11.3.- Desventajas.....	16
1.11.4.- Consideraciones generales .....	16
1.12.- Otros sistemas de producción hidropónica.....	18
1.12.2.- New Growing System (NGS).....	18
1.12.3.- Raíz flotante .....	19
1.13.- Sistema radicular y regulación hormonal.....	20

1.13.2.- Raíz principal.....	20
1.13.3.- Raíces laterales.....	20
1.13.4.- Raíces adventicias .....	21
1.13.5.- Regulación hormonal en la formación de raíces.....	21
1.14.- Movimiento del agua y nutrientes en la planta.....	22
1.15.- Suelo-planta-atmósfera .....	22
1.15.2.- Absorción (raíces) .....	23
1.15.3.- Transporte (tallos) .....	24
1.15.4.- Transpiración (hojas).....	26
1.16.- Fotosíntesis .....	27
1.16.2.- Fase luminosa .....	28
1.16.3.- Fase oscura o ciclo de Calvin.....	29
1.17.- Formación del fruto.....	31
1.17.2.- Fecundación .....	31
1.17.3.- Cuajado .....	32
1.17.4.- Crecimiento .....	32
III.- MATERIALES Y METODOS.....	34
3.1.- Lugar del experimento .....	34
3.2.- Material vegetal y establecimiento del experimento .....	34
3.3.- Descripción de los tratamientos.....	35
3.4.- Variables evaluadas .....	38
3.5.- Diseño experimental .....	39
IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
4.1.- Crecimiento de las plantas de tomate.....	40
4.1.2.- Longitud de tallo .....	41

4.1.3.- Diámetro de tallo .....	43
4.1.4.- Longitud de hoja .....	44
4.2.- Variables de rendimiento de la producción de tomate .....	46
4.2.2.- Número de frutos por planta .....	47
4.2.3.- Tamaño del fruto .....	47
4.2.4.- Peso del fruto .....	47
4.2.5.- Rendimiento .....	48
4.3.- Respuesta fotosintética y otras variables fisiológicas .....	49
4.3.2 Eficiencia intrínseca.....	51
4.3.3 Eficiencia cuántica.....	52
V.- CONCLUSION.....	54
VI.- LITERATURA CITADA .....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Concentración de iones en la solución nutritiva de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo de tomate.....	35
<b>Tabla 2.</b> Datos máximos, mínimos y promedios de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante los meses marzo a noviembre. ....	35
<b>Tabla 3.</b> Parámetros de crecimiento, longitud de tallo (LT), longitud de hoja (LH) y diámetros de tallo (DT) en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato.....	41
<b>Tabla 4.</b> Indicadores del rendimiento en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa. ....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Carrete utilizado para el tratamiento 1. A: diámetro interno (60 cm), B: diámetro externo (80 cm), C: base (15 cm), D: ceja (13cm). .....	37
<b>Figura 2.</b> Sistema NFT modificado en carretes. ....	37
<b>Figura 3.</b> Trasplante de plántulas en el sistema NFT modificado en carrete y en sustrato en bolsa. ....	37
<b>Figura 4.</b> Tallos enrollados en el carrete y producción de raíces adventicias. ....	37
<b>Figura 5.</b> Longitud del tallo acumulado en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa. ....	43
<b>Figura 6.</b> Diámetro de tallo en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa. ....	44
<b>Figura 7.</b> Longitud de hoja en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa. ....	45
<b>Figura 8.</b> Tasa fotosintética, temperatura de las hojas, transpiración foliar y conductancia total de los estomas, en 10 plantas de tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa con sustrato. ....	51
<b>Figura 9.</b> Eficiencia intrínseca y cuántica en 10 plantas de tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa con sustrato. ....	53

## RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), es una de las hortalizas que encabeza la mayor producción por volumen y consumo a nivel mundial, en el 2020 se produjeron en el mundo 186,821,216 t, y nuestro país ocupó el noveno lugar de producción. Comúnmente se emplean variedades de crecimiento indeterminado para lograr mayor rendimiento, como resultado se tienen tallos de mayor longitud, disminuyendo el transporte de agua y nutrientes a las zonas productivas apicales en etapas avanzadas del cultivo, obteniendo frutos cada vez de menor tamaño durante el ciclo, por ello se propone una técnica modificada de NFT (Nutrient Film Technique) utilizando un carrete con diámetro interno de 60 cm fabricado con fibra de vidrio y vitrocel, el cual los tallos se enrollan generando raíces adventicias y siempre se mantiene un tallo productivo no mayor a 2.5 m en longitud. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta productiva y fisiológica de plantas de tomate establecidas en un sistema de cultivo en carrete, bajo un diseño completamente al azar. El T1 (testigo) consistió en un sistema de producción en bolsa con sustrato y para el T2 en carrete. Los resultados indican que no hay diferencias significativas entre los tratamientos en las variables de crecimiento: longitud de tallo, longitud de hoja y diámetro de tallo, pero si las hay diferencia significativa en variables de rendimiento como frutos por planta, peso por fruto, diámetro ecuatorial y kilogramos por planta, siendo el rendimiento en el sistema en carrete 16.3% mayor que el sustrato en bolsa. Referente a fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y temperatura de hoja hubo diferencias significativas entre los tratamientos, al igual que en la eficiencia intrínseca del agua, así como la eficiencia cuántica. De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el sistema en carrete es una alternativa viable para la producción comercial de tomate bajo invernadero.

**Palabras clave.** Crecimiento, fotosíntesis, hidroponía, rendimiento, *Solanum lycopersicum* L.

## I.- INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.), es una de las hortalizas que encabeza la mayor producción por volumen y consumo a nivel mundial (CEDRSSA, 2020). En el 2020 se produjeron en el mundo 186,821,216 t, donde la mayor producción se concentró en los países de: China (34.67%); con 64,768,158 t y un rendimiento de 5.85 kg/m<sup>2</sup>, India (11.01%); con 20,573,000 t y un rendimiento de 2.53 kg/m<sup>2</sup>, Turquía (7.07%); con 13,204,015 t y un rendimiento de 7.26 kg/m<sup>2</sup> y Estados Unidos (6.54%); con 12,227,402 t alcanzando el mayor rendimiento de 11.07 kg/m<sup>2</sup> (FAO,2020).

En el 2020, México ocupó el noveno lugar de producción de tomate a nivel mundial, cubriendo el 2.21% con 4,137,342 t con un rendimiento promedio de 4.87 kg/m<sup>2</sup>, siendo la hortaliza de mayor producción (FAO, 2020). Es cultivada para atender la demanda nacional y de exportación, en el 2020 el volumen exportado alcanzó 1,662,000 ton y en el 2021 la mayor demanda se realizó en estos cuatro países: Estados Unidos, Canadá, Japón y Emiratos Árabes Unidos (SIAP, 2021). Los principales estados productores en el ciclo primavera-verano son: San Luis Potosí, Zacatecas, Michoacán, Jalisco y Puebla; y en el ciclo otoño–invierno son: Sinaloa, Sonora, Baja California, Querétaro y Michoacán (SIAP, 2020). En 2020 se registraron 15,534 has de tomate bajo agricultura protegida, de las cuales 7,314 has se cultivaron bajo invernaderos, con una producción total de 1,350,018 ton, en los principales estados de: Jalisco (134,394 t); con un rendimiento de 12.57 kg/m<sup>2</sup>; Querétaro (131,041 t); con un rendimiento de 49.79 kg/m<sup>2</sup>; y Puebla (130,531 t); con un rendimiento de 15.68 kg/m<sup>2</sup> (AMHPAC, 2020).

La producción de tomate bajo invernadero representa una alternativa y una oportunidad para la comercialización, ya que ofrece protección contra las condiciones adversas del clima, además mejora la calidad y aumenta el rendimiento

del fruto (Alemán *et al.*, 2016), normalmente se usan en variedades de hábito indeterminado, con una densidad de población de 2 a 3 plantas por m<sup>2</sup>, los tallos se dejan crecer hasta más de 7 m, para cosechar 15 o más racimos por planta en un solo ciclo de cultivo por año (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014).

El uso de sistemas hidropónicos bajo invernadero es ideal para la producción de tomate indeterminado, ya que tiene una alta eficiencia en el uso del agua y fertilizantes (López *et al.*, 2011). La hidroponía es una técnica de cultivo en la que no se utiliza suelo y los nutrientes que necesita la planta son suministrados a través del agua usando Solución Nutritiva (SN) (Castañares, 2020). Este sistema puede ser abierto o cerrado, es decir, en el sistema abierto el exceso de la SN que drena no se reutiliza y en el sistema cerrado, la SN excedente se recupera y se recicla en un sistema de recirculación cíclica (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014). El sistema cerrado se divide en estático, como la raíz flotante; y continúa, como el sistema NFT (Nutrient Film Technique) y NGS (New Growing System) (Olvera-Cruz, 2016), que consiste en la circulación constante de una lámina fina de SN a través de las raíces, no existiendo pérdida o salida al exterior de la SN (Gavidia, 2017).

Pero el cultivo de tomate indeterminado, presenta un problema de rendimiento decreciente, ya que el tamaño del fruto por racimo, no se mantiene uniforme durante todo el ciclo de producción (Peil y Gálvez, 2004; Ardila, Fischer y Balanguera, 2011), probablemente la causa a este problema sea que, al tener un tallo de mayor longitud, se disminuye la cantidad de agua y nutrientes en la parte productiva apical de la planta (Arriaga, De la Cruz, y Mandujano, 2016) y como consecuencia se tienen cada vez frutos de menor tamaño, ya que están estrechamente relacionados con la posición del racimo en la planta, obteniendo frutos de mayor tamaño cuando los racimos se encuentran más próximos a la base del tallo que cuando son más distantes (Ardila, Fischer y Balanguera, 2011). Debido a lo mencionado anteriormente, en el presente estudio, se propone un innovador sistema de producción Hidropónico NFT modificado, llamado Cultivo en Carrete, que permite tener mejor disponibilidad de agua en el sistema radicular de las plantas, hacer más eficiente el espacio e incrementar el rendimiento, además de cambiar la condición

de tener tallos largos a tallos cortos, al implementar un carrete (cilindro) donde se coloca la planta y conforme avance su crecimiento, el tallo se enrolla en el carrete y este forma raíces adventicias, y cuando llegue a dar dos vueltas completas se corta la raíz principal con una porción del tallo y así se mantendrán tallos productivos cortos y siempre con raíces nuevas.

## **1.1.- Objetivos**

### 1.1.2.- General

Evaluar la respuesta fisiológica y productiva de plantas de tomate establecidas en un sistema hidropónico NFT modificado llamado Cultivo en Carrete (CC).

### 1.1.3.- Específico

- Medir el crecimiento de las plantas de tomate en un sistema de Cultivo en Carrete.
- Evaluar el rendimiento de tomate establecido en un sistema de Cultivo en Carrete.
- Evaluar la respuesta fotosintética en las hojas de plantas de tomate establecidas en un sistema de Cultivo en Carrete.

## **1.2.- Hipótesis**

Con tallos cortos (< 2.5 m) se mantendrá una oferta de agua y nutrientes alta, lo que incrementará el ciclo productivo y permitirá un mayor rendimiento en comparación con los tallos largos de las plantas testigo al final del ciclo.

## II.- REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1.- Origen e historia

El origen del tomate es al oeste de América del Sur, desde el norte de Chile a través de Perú hasta el norte de Ecuador, incluidas las Islas Galápagos, es ahí donde se han encontrado los parientes silvestres del cultivo (Nakazato, Warren y Moyle, 2010; Gallo *et al.*, 2011; Flores *et al.*, 2017). Se distribuyó por diversos hábitats que incluyen el desierto de la costa del Pacífico a nivel del mar, los verdes valles interandinos y las regiones montañosas andinas a una altitud de 3,300 msnm (Blanco *et al.*, 2012). Continuó por el centro del continente americano, viajando hasta la República Mexicana (Nakazato, Warren y Moyle, 2010).

Después de extenderse hacia el norte posiblemente como maleza en la época precolombina, no fue domesticada extensivamente hasta que llegó a México, y desde allí se difundieron las formas cultivadas (Pacheco, Chávez y Carrillo, 2014). Por lo que se ha considerado esta zona “centro de domesticación”, particularmente en la vertiente del Golfo de México en los estados de Veracruz y Puebla (Saavedra, Figueroa, & Cauih, 2017).

### 1.2.- Clasificación taxonómica

Linnaeus en 1753 realizó la primera clasificación taxonómica denominando al tomate cultivado como *Solanum lycopersicum.*, pero Miller, en 1768 le asignó el género *lycopersicon* y la especie *esculentum*, clasificación que fue aceptada hasta que trabajos posteriores propiciaron que se volviera a renombrar como *Solanum lycopersicum* L. (Fernández, Cámara y Quintela, 2007). Actualmente la taxonomía es la siguiente (Peralta, Spooner, y Knap, 2008; Mata, 2021):

- División: Magnoliophyta
- Clase: Magnoliopsida
- Subclase: Asteridae
- Orden: Solanales
- Familia: Solanaceae
- Subfamilia: Solanoideae
- Género: Solanum
- Especie: Lycopersicum L.

### **1.3.- Hábitos de crecimiento**

El hábito de crecimiento de las plantas de tomate, se divide en tres grupos: los de hábito determinado su crecimiento es limitado, el semideterminado su crecimiento es intermedio y el indeterminado su crecimiento es ilimitado, cada una tiene diferente morfología (Monardes, 2009).

#### **1.3.2.- Determinado**

La producción de estas plantas se maneja dejando varios tallos que se desarrollan simultáneamente, los tallos son cortos, compactos y producen frutos durante un periodo relativamente corto (Escobar, 2009). El tallo principal desarrolla la primera inflorescencia después de emitir de 7 a 12 hojas e intercalan de una hoja a veces hasta 2 entre cada racimo floral, hasta que en la tercera o cuarta inflorescencia el ápice terminal se diferencia en un racimo floral (esto dependerá de la variedad); en ese caso pueden retomar el crecimiento vegetativo a partir de un brote axilar, pero inmediatamente este brote se transforma también en reproductivo. Normalmente se cultivan a campo abierto (Iglesias, 2006).

#### **1.3.3.- Semideterminado**

Se caracteriza por la interrupción del crecimiento de sus tallos después de un determinado número de inflorescencias, usualmente en una etapa muy avanzada del ciclo del cultivo (López-Marín, 2017).

#### 1.3.4.- Indeterminado

Estas plantas comparten el crecimiento vegetativo con el reproductivo y según el cultivar, el primer racimo floral aparece luego de haber diferenciado entre 7 y 12 hojas, para luego intercalar racimos florales cada 3 hojas (a veces 2 o 4), ello depende de una interacción genotipo-fotoperiodo (Iglesias, 2006; Escobar, 2009; Monardes, 2009). En la parte lateral del tallo se presentan las inflorescencias, manteniendo el brote terminal siempre vegetativo, alcanzando longitudes mayores a 5 metros. A lo largo de todo el tallo se producen brotes axilares los cuales deben podarse para evitar su proliferación (Escobar, 2009; Monardes, 2009).

Son plantas perennes que se extienden por períodos muy largos, se cultivan en invernaderos con un soporte o tutores para mantenerlas erectas (Iglesias, 2006; Escobar, 2009).

### **1.4.- Descripción de la planta**

El tomate es una planta perenne anual de porte arbustivo, según el hábito de crecimiento, se desarrolla de forma rastrera, semierecta o erecta (CCB y VFE 2015).

#### 1.4.2.- Raíz

La planta del tomate posee una raíz pivotante principal, la cual frecuentemente se afecta en el trasplante, pero en siembra directa tiene la capacidad de alcanzar profundidades de 120 a 300 cm si las condiciones del suelo son favorables. De la raíz principal se forma un sistema denso de raíces laterales fibrosas, con el potencial de alcanzar un radio de hasta 150 cm. En los nudos inferiores del tallo y ramas principales se pueden desarrollar raíces adventicias (Fornaris, 2007).

#### 1.4.3.- Tallo

El tallo es ligeramente anguloso, de color verde, semileñoso y con tricomas (pilosidades) simples y glandulares. En la base mide de 2 a 4 cm de diámetro y en la parte superior es más delgada. El tallo principal va desarrollando las hojas, tallos secundarios e inflorescencias y en la parte distal se encuentra el meristemo apical, donde se forman los nuevos primordios foliares y florales (Escobar, 2009; Monardes, 2009; López-Marín, 2017). El tallo, al principio tiene un porte erguido,

posteriormente rastrea por el suelo, tiene una apariencia herbácea, la cual está compuesta de epidermis con pelos, debajo de ella se encuentra el córtex cuyas células más externas tienen clorofila y son fotosintéticamente activas, cilindros vasculares (xilema y floema) y tejido medular (Escobar, 2009; López-Marín, 2017).

#### 1.4.4.- Hoja

La hoja es imparipinnada, es decir, es una hoja compuesta por folíolos alternos que termina en un folíolo individual en la parte apical, (Escobar, 2009), cada hoja presenta de 7 a 9 folíolos que miden 4 a 60 mm por 3 a 40 mm. Los folíolos son peciolados, lobulados con bordes dentados y generalmente de color verde (López-Marín, 2017). Las hojas son bifaciales, significa que tiene dos superficies y es la epidermis que cubre el mesófilo, la epidermis superior se llama haz y está constituida por pelos glandulares, la epidermis inferior es el envés y contienen abundantes estomas que facilitan el intercambio gaseoso (Nuez, 2001).

La hoja se encuentra dispuesta en posición alterna sobre el tallo, la posición puede ser semierecta, horizontal o inclinada (Monardes, 2009). El número de hojas por tallo y la frecuencia de aparición están determinados principalmente por el hábito de crecimiento. Se producen a intervalos de 2 a 3 días, en función de las condiciones ambientales, en general la producción de hojas y de primordios foliares aumentan con la irradiación diaria y con la temperatura, siendo constantes cuando las condiciones ambientales son ideales (Escobar, 2009).

#### 1.4.5.- Inflorescencia

La inflorescencia puede ser simple, bifurcada o ramificada. El número de las flores es variable y en el mismo racimo las flores se abren de forma secuencial (Fornaris, 2007). La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, formando así el racimo floral, el cual está compuesto de varios ejes y cada uno tiene una flor de color amarillo brillante (Monardes, 2009).

La floración es un proceso complejo que puede ser afectado por numerosos factores, entre los que destacan la variedad, la temperatura, la iluminación, la

competencia con otros órganos de la planta, la nutrición mineral y los tratamientos con reguladores de crecimiento (Nuez, 2001).

#### 1.4.6.- Flor

La flor es completa, actinomorfa y posee un ovario súpero. El cáliz y la corola constan de cinco o más sépalos pubescentes en el lado externo con el mismo número de pétalos de color amarillo, formando una hélice. Los estambres, pétalos y sépalos se insertan en la base del estigma. Poseen de cinco a seis estambres, que están soldados por las anteras y forman un cono estaminal que envuelve al gineceo y evitan la polinización cruzada. El ovario es bi o plurilocular (Monardes, 2009; López-Marín, 2017). El pedicelo es corto y curvo hacia abajo, a mitad se observa un engrosamiento que corresponde a una zona de abscisión. La flor tiene un diámetro aproximado de 2 cm (Fornaris, 2007).

La diferenciación y desarrollo de la flor constituyen etapas previas en la fructificación y por consecuencia todos los factores que afectan a la floración pueden influir sobre la precocidad, rendimiento y calidad de los frutos (Nuez, 2001)

#### 1.4.7.- Fruto

El fruto es una baya bi o plurilocular de color amarillo, rosado o rojo debido a la presencia de licopina y carotina, en distintas y variables proporciones. Dependiendo de la variedad y tipo, puede tener forma de pera, redonda o achatada, su superficie lisa o asurcada, siendo su tamaño muy variable (López-Marín, 2017). Puede alcanzar un peso que va de mg hasta 600 g. El fruto está formado por el pericarpio, mesocarpio, endocarpio carnosos, placenta y semillas (Monardes, 2009).

El fruto tarda de 60 a 70 días desde la antesis hasta el momento de la cosecha. Está constituido por un 94-95% de agua y el restante 5-6% es una mezcla compleja en la que predominan los constituyentes orgánicos, los cuales dan al fruto su sabor característico y su textura (Escobar, 2009).

#### 1.4.8.- Semilla

La semilla es ovoide, comprimida y parduzca con dimensiones aproximadas de 5 x 4 x 2 mm y está constituida por el embrión, el endospermo y la testa o cubierta seminal (López-Marín, 2017). El embrión cuyo desarrollo dará lugar a las plantas adultas, está constituido, a su vez, por la yema apical, dos cotiledones, el hipocotilo y la radícula. El endospermo contiene dos elementos nutritivos necesarios para el escarolo inicial del embrión. La testa o cubierta seminal está constituida por un tejido duro e impermeable, recubierto de pelos, que envuelven y protegen el embrión y el endospermo (Rodríguez-Manzano, 2019).

#### 1.5.- Agricultura protegida

Se define como Agricultura Protegida a “toda estructura cerrada, cubierta por materiales transparentes o semitransparentes, que permite obtener condiciones artificiales de microclima para los cultivos” (Santos, Obregón y Salamé, 2010). Es un sistema que tiene como característica básica proteger a los cultivos, ya que, por naturaleza, la agricultura se encuentra asociada al riesgo y estos pueden ser: climáticos, económicos y/o de limitación de recursos productivos, modificando la forma de producir alimentos. Como principal ventaja, genera un mejor ingreso al productor, permitiendo el desarrollo de cultivos fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, con mejores rendimientos en menor espacio y con un mejor precio en el mercado, y se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades (Moreno, Aguilar, y Luévano, 2011). Se han desarrollado diferentes tipos de estructuras, de acuerdo a los requerimientos climáticos de cada especie y los factores climáticos de cada región (Juárez *et al.*, 2011), clasificándose en: invernadero, casa sombra, macro y microtúnel (Santos, Obregón y Salamé, 2010).

En México, existen 44,856 has bajo agricultura protegida, de las cuales 11, 787 has son de invernadero, 20,447 has de casa sombra y 12,622 has de macrotúnel. Las principales especies cultivadas son: tomate (*Lycopersicon esculentum* L.), pepino (*Cucumis sativus* L.), pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.), fresa (*Fragaria* sp.) y frambuesa (*Rubus idaeus* L.) (AMHPAC, 2020); también se producen, plantas ornamentales, plántulas, plantas medicinales y aromáticas (Juárez *et al.*, 2011).

El cultivo de tomate bajo condiciones protegidas es relativamente nuevo, generando un impacto importante en los últimos años, por su incremento, superficie, productividad y calidad, con un rendimiento promedio de 5 a 8 kg/planta, superando tres veces a la de campo abierto, que es de 1.5 y 2 kg/planta (Ortega *et al.*, 2010).

### **1.6.- Producción de tomate bajo invernadero**

El invernadero se describe como una estructura de mayor solidez, construida con diversos materiales transparentes, cuya altura es mayor a dos metros, con anchos mayores a seis metros y largos variables, herméticamente cerrados. El techo puede estar cubierto por plástico, vidrio, fibra de vidrio o láminas corrugadas de policarbonato pudiendo incluir aberturas para una ventilación, las paredes frontales y laterales pueden ser cubiertas con el mismo material o por mallas anti-insectos. Al unir varias naves o módulos se obtienen grandes superficies cubiertas, conocidas como invernaderos en batería, permitiendo que todas las labores y prácticas se realicen en el interior de las instalaciones (Santos, Obregón y Salamé, 2010; Juárez *et al.*, 2011).

En la producción de tomate bajo invernadero se requiere de medios y condiciones para llevarse a cabo (Ortega *et al.*, 2010). Existen invernaderos activos, que son los que incorporan climatización automatizada para lograr una mayor independencia del clima externo, así como riegos computarizados, inyecciones de CO<sub>2</sub> y el uso de hidroponía, y los invernaderos pasivos que son semiclimatizados, que utilizan tecnología simple, programando riego en suelo o sustrato (Syngenta, 2010). Aun así, los factores principales que determinan el éxito del invernadero son las características y necesidades climáticas del cultivo.

### **1.7.- Características deseables del invernadero**

Para una mejor producción de tomate, se toman en cuenta las siguientes características:

- Ventilación cenital y lateral con malla antiinsectos, para eliminar el exceso de calor e impedir la entrada de insectos.

- Altura mayor a 2 m en pilares laterales y altura mayor a 4 m en el centro, para evitar quemaduras.
- Capacidad de carga viva de 70 kg/m<sup>2</sup> en cosecha continua de dos a tres meses, soportando de 7 plantas/m<sup>2</sup> en un sistema de alta densidad y de 3 a 4 plantas/m<sup>2</sup> de baja densidad.
- Plásticos lechosos, que permitan el acceso de luz solar y que aumenten la luz difusa, para reducir de 20 a 40% la radiación solar al interior.
- Amortiguación de la temperatura y HR mediante el uso de nebulizadores, para disminuir la temperatura e incrementar la HR.
- La orientación del invernadero, siendo de norte a sur o cualquier otra debe ser justificada en función de los vientos dominantes o la topografía (Syngenta, 2010).

### **1.8.- Necesidades climáticas**

El medio ambiente es uno de los factores más importantes, ya que juega un papel determinante en el desarrollo de las plantas, para lograr un índice elevado de rendimiento y calidad.

#### **1.8.2.- Temperaturas óptimas**

La temperatura en las plantas tiene efectos presentes en la fotosíntesis, respiración, división y crecimiento de las células, actividades enzimáticas, capacidad de absorción en las raíces y disponibilidad de los nutrientes (Syngenta, 2010). Un exceso de temperaturas induce al cierre estomático, reduciendo la transpiración y la fotosíntesis, como consecuencia, se reduce la tasa de transporte del xilema y la producción de biomasa, afectando la producción o calidad del fruto (Mazuela, Acuña, Álvarez y Fuentes, 2010).

Cuando se tiene temperaturas fuera de los límites requeridos, se presentan alteraciones irreversibles, que originan anomalías o desórdenes que afectan la producción del cultivo. Las temperaturas óptimas para cada fase de desarrollo son: germinación de 20 - 25°C diurna, crecimiento vegetativo de 25 - 27°C diurna y 17 -

20°C nocturno, floración de 21 - 25°C diurna y 13 - 17°C nocturna, fructificación 25°C diurna y 18°C nocturna, maduración 24 - 28°C diurna (Vallejo y Estrada, 2004).

#### 1.8.3.- Humedad Relativa (HR)

La Humedad Relativa (HR) óptima para un buen desarrollo dentro del invernadero es de 60-75%, una HR menor al 15% causa transpiración excesiva provocando un estrés hídrico que perjudica al fruto, una HR mayor a 94% el polen se compacta (Olvera-Rodríguez, 2016) y por debajo del 50% el estigma se deshidrata provocando una baja polinización, y una HR arriba del 80% provoca mayor incidencia de enfermedades fungosas (Syngenta, 2010).

La humedad del ambiente interviene en varios procesos, amortiguando los cambios de temperatura, incrementando o disminuyendo la transpiración y en el crecimiento de los tejidos. Al aumentar disminuye la evaporación y la evapotranspiración, al igual a mayor temperatura menor HR y mayor consumo de agua (Syngenta, 2010).

#### 1.8.4.- Ventilación

En el invernadero, el principio de la circulación del aire es: “el aire fresco es más pesado que el aire caliente” por eso, se tiene que contar con ventilación lateral y cenital. La ventilación influye de manera decisiva en la regulación de T°, HR, flujo de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, en la sanidad vegetal, intensidad fotosintética y transpiración, es por ello que, para mejorar la ventilación, se tiene en cuenta estas medidas: dejar abiertas las ventilas en los días con altas temperaturas, cerrar las ventilas en la noche cuando la temperatura sea menor a 10°C y cerrar en invierno para evitar la pérdida de calor o en caso necesario, utilizar calefacción para evitar drásticos descensos de temperatura (Syngenta, 2010), para ello se distingue dos tipos de ventilas, una natural y otra forzada.

La ventilación natural es una de las mejores y más económicas herramientas de control del clima, interviene en el intercambio de aire entre el interior y exterior, repone los niveles de CO<sub>2</sub>, disminuye temperatura y humedad, favorece la polinización y la fructificación, sin embargo, el bajo índice de ventilación genera problemas de enfermedades, rendimiento y calidad de los cultivos. La ventilación

forzada se distingue por dos sistemas de aire: la de admisión y de extracción, el principio es crear un flujo de aire a través del invernadero donde los ventiladores succionan el aire exterior al interior, por medio de las aberturas situadas en el lado opuesto (Arellano *et al.*, 2011).

#### 1.8.5.- Luz

El fotoperiodo es la respuesta de las plantas a la duración de la luz, el tomate tiene un fotoperiodo neutro, es decir que puede desarrollarse tanto en fotoperiodo corto (<12 - 14 hrs) como en largo (>12 - 14 hrs) (Syngenta, 2010).

La luz solar es uno de los factores más importantes, ya que es la energía que permite arrancar el aparato fotosintético, sin embargo, no toda la radiación solar es útil, existe un rango donde los fotones incidentes pueden convertirse en energía química ATP (adenosín trifosfato), y se llama Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). Así que, para el desarrollo óptimo de las plantas se requiere que la cubierta deje pasar una longitud de onda entre 400-700 nm, en este intervalo, la energía de la luz se transfiere a los productos fotosintetizadores e influyen directamente sobre el crecimiento y la calidad de los productos (Jarquín, 2013), así que con suficiente energía solar se obtiene un mejor desarrollo, ya que cuando está baja afecta la apertura de los estomas.

### 1.9.- Hidroponía

El cultivo sin suelo es una técnica de producción agrícola que permite el desarrollo de las plantas sin la necesidad que éste sea partícipe del soporte ni la nutrición. Los sistemas de crecimiento y/o soporte de la planta están constituidos por un medio inerte como sustrato o agua. Los nutrientes, aplicados en forma artificial, llegan a través del agua. Dentro de los cultivos sin suelo se encuentra la hidroponía. (Ricardo, 2019)

El término hidroponía fue utilizado por primera vez en 1930, deriva del griego HIDRO (agua) y PONOS (labor o trabajo) que literalmente significa trabajo en agua (Barbado, 2005; Beltrano y Giménez, 2015), pero técnicamente es una tecnología para desarrollar plantas en solución nutritiva (SN), con o sin el uso de un medio

artificial para proveer soporte mecánico a la planta. Los sistemas se clasifican en abiertos (cuando el lixiviado y la SN drenada no se reciclan, sino que se pierde vía subsuelo o se conduce fuera del invernadero) o cerrados (cuando el lixiviado y la SN se recircula con el objetivo de reutilizarse con una previa esterilización, ajuste de pH, CE y concentración de nutrientes, para ahorrar agua y evitar la contaminación del suelo) (Olvera-Rodríguez, 2016; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014). Los cerrados se subdividen en estáticos como la raíz flotante y continuos como Nutrient Film Technique (NFT) y New Growing System (NGS) (Olvera-Rodríguez, 2016).

Estos esquemas se pueden aplicar desde micro a macro escalas. Su implementación es una opción de mejora cuando se presentan pérdidas en la calidad del suelo, contaminación, plagas y/o enfermedades (Olvera-Rodríguez, 2016).

### **1.10.- Sustratos**

El sustrato es todo material sólido distinto del suelo, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular de la planta, desempeñando, un papel de soporte, interviniendo o no en el proceso de nutrición mineral para la planta (Barbado, 2005). Las cuatro condiciones que debe cumplir un sustrato son: proveer agua, suministrar nutrientes, permitir el intercambio de gases entre la zona radicular y el exterior del sustrato y dar soporte a las plantas (Pineda *et al.*, 2012).

El sustrato debe de mantener la cantidad de agua requerida para la planta porque esta solo absorbe la cantidad de agua que necesita para mantenerse hidratada, clasificándose en tres grupos:

- Sustratos inorgánicos inertes; piedra pómez, grava, tezontle, roca volcánica, carbón vegetal, arena y perlita.
- Sustratos orgánicos; fibra de coco, cáscara de arroz, aserrines y peat moss.
- Sustratos sintéticos; espuma de poliestireno y espuma de poliuretano (Olvera-Rodríguez, 2016).

#### 1.10.2.- Ventajas

- Sustratos totalmente desinfectados
- Facilitan el manejo del cultivo.
- Se usa en cultivos de mediana y gran escala
- Ofrece un buen drenaje, ahorra fertilizantes y es fácil de esterilizar
- El sistema de riego se puede automatizar con facilidad (Albuja *et al.*, 2021).

#### 1.10.3.- Desventajas

- El elevado costo de instalación.
- Se necesita un tanque de almacenamiento para la solución nutritiva.
- El sustrato puede sufrir cambios bruscos de temperatura.
- Las plantas son más sensibles al nivel de pH, a los nutrientes y a la temperatura de la solución (Albuja *et al.*, 2021).

### 1.11.- Nutrient Film Technique (NFT)

Una alternativa para la producción de tomate en sistemas hidropónicos 100% en agua, sin la intervención de ningún sustrato, es la técnica de lámina de nutrientes o Nutrient Film Technique (NFT) (Savvas, 2003). Este sistema se basa en el desplazamiento continuo de una fina lámina de SN a lo largo de canales de cultivo que entran en contacto con las raíces de las plantas, contando con canales, tanque de alimentación y una bomba, así que la SN es bombeada desde el tanque, hacia los canales de cultivo por donde circula proporcionando a la raíz, nutrientes y humedad necesaria para su crecimiento y desarrollo, la SN que se recoge al final de los canales se dirige nuevamente al tanque para su recirculación (Resh, 2013)

#### 1.11.2.- Ventajas

Se obtiene un desarrollo uniforme del sistema radicular, debido a que suministra la SN de manera homogénea aprovechando adecuadamente el uso de agua, así como de los fertilizantes hidrosoluble (Puerta, Shinohara, y Maruo, 2007), al igual evita la contaminación del suelo a través de la salinización y el desplazamiento por percolación de sales inorgánicas llegando a la zona de agua freática (Gruda, 2009; Savvas, 2003), entre otras ventajas que destacan son:

- Aprovechamiento eficiente de agua y nutrientes, mejorando el proceso metabólico al disminuir el gasto energético que se traduce en mayores rendimientos, mejor calidad organolépticas, sanitaria y nutricional del fruto.
- Mejor oxigenación del sistema radical.
- Disminución notoria de malezas que compitan por nutrientes
- Importante disminución en la incidencia de enfermedades radiculares.
- Se obtiene un alto rendimiento
- Buena calidad organoléptica, sanitaria y nutricional del producto.
- Mínimo impacto ambiental (Gruda, 2009; Krauss *et al.*, 2006; Magán *et al.*, 2008; Savvas, 2003).

#### 1.11.3.- Desventajas

- El costo inicial en la implementación del sistema.
- El control riguroso sobre la solución nutritiva en la concentración de macro y micronutrientes que influyen directamente en el rendimiento de las plantas.
- El manejo adecuado del sistema y que el personal agrícola tenga cierto conocimiento técnico (Guanoluisa, 2014).

#### 1.11.4.- Consideraciones generales

Para instalar un sistema NFT se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Los canales de cultivo deben tener una pendiente de 0,5 - 1 %, para que la solución pueda circular por gravedad de un extremo a otro.
- El flujo de la SN en los canales de cultivo debe estar entre 1 y 2 L/min.
- Debido a que es un sistema cerrado, el material de los canales, tanque, bomba y demás accesorios que entren en contacto con la SN deben ser libres de componentes tóxicos para evitar una reacción.

El ambiente al que se encuentra expuesto el sistema radicular en el sistema NFT incide en los procesos de crecimiento, desarrollo y rendimiento de la planta, por lo que se puede mencionar ciertos aspectos relacionados a la raíz y de la SN, ya que se encuentran en contacto (Guanoluisa, 2014).

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de unas sustancias (Olvera-Rodríguez, 2016). Jones (2016), dice que el rango adecuado en la SN se encuentra entre 5.8 y 7, dentro del cual la mayoría de elementos se encuentran disponibles y se realiza la absorción de los nutrientes sin mayor dificultad. Pero Olvera-Rodríguez (2016) comenta que para el cultivo de tomate se maneja un pH de 5.5 a 6.5, sin embargo, el pH de la SN no es estático, ya que depende del CO<sub>2</sub> del ambiente y si está o no abierto el contenedor donde se encuentra la SN. Es por ello que el control es necesario para evitar que se precipiten los nutrientes en forma de sales insolubles que pueden obstruir el sistema de riego por goteo. De este modo, la disponibilidad de los componentes de la SN se ve influenciada por las alteraciones que pueda sufrir el pH causando una excesiva absorción o produciendo precipitaciones, debido a esto, es necesario un control para mantener el pH dentro del rango adecuado (Guanoluisa, 2014).

La conductividad eléctrica (CE) expresa la concentración total de sales solubles contenidas en el agua, los niveles de CE para las diferentes etapas fenológicas de la planta de tomate son: 0,5d S/cm para la fase inicial-trasplante, 1,0 - 1,5 dS m<sup>-1</sup> para la vegetativa, 1,5 - 2,0 dS m<sup>-1</sup> para la floración, 2,0 - 2,5 dS m<sup>-1</sup> para la reproductiva-fructificación. Para ello es recomendable realizar un análisis de agua que será destinado para la preparación de la SN, ya que una salinidad alta puede provocar toxicidad al cultivo (Olvera-Rodríguez, 2016). La CE de la solución debe ser menor a 2.5 dS m<sup>-1</sup>, se debe mencionar que la medición de este parámetro representa la concentración total de sales, más no provee información de la concentración de cada nutriente. Debido a que la composición de la solución nutritiva sufre modificaciones, es necesario restituir el tenor salino de la solución nutritiva (Jones, 2016).

La temperatura (T°) de la raíz es más fácil de modificar, ya que mediante el uso del sistema NFT el control es más eficiente. Por lo que se aconseja que la temperatura a la que se encuentra la SN sea cercana a la ambiental (entre 20° y 25° C) en la cual se absorben de manera óptima los nutrientes (Jones, 2016).

La presencia de oxígeno (O<sub>2</sub>) en la solución nutritiva es importante para el desarrollo de la planta en los primeros estados de crecimiento debido a que las raicillas se encuentran principalmente sumergidas en agua, además se difunde más lento en agua que en aire (Guanoluisa, 2014) es por eso que disminuye conforme circulan por el canal de cultivo debido a la absorción que realizan las raíces, siendo mayor la concentración en un extremo del canal, por lo que su longitud es un factor crítico para el diseño del sistema (Jones, 2016), es por ello que Resh (2013) recomienda longitudes máximas de a 15 m. En caso contrario, un ambiente anaerobio a la raíz puede producir daños como pudrición radicular, marchitamiento, clorosis foliar, lento crecimiento (Guanoluisa, 2014).

### **1.12.- Otros sistemas de producción hidropónica**

#### **1.12.2.- New Growing System (NGS)**

New Growing System (NGS) es un sistema de recirculación que se diseñó para el cultivo a campo abierto, inicialmente como un sistema fijo para cultivos de lechuga en zonas áridas y semiáridas, con el objetivo de racionalizar el uso del agua. Posteriormente, el sistema se desarrolló para su uso bajo techo en un sistema automatizado con una alta densidad de plantas, permitiendo el control de insumo, agua, fertilizantes, productos químicos, mano de obra, así como la reutilización de drenajes y la reducción de desperdicios (Nicola *et al.*, 2021), donde los cultivos se desarrollan en un ambiente óptimo, con el agua, el oxígeno y los nutrientes necesarios (Varanda, 2018).

En el NGS, las raíces crecen homogéneamente en un sistema multinivel, compuesto por una película multicanal para favorecer el flujo de SN, así como el crecimiento y extensión radicular, el cultivo de tomate consta de tres canales interconectadas, los canales internos tienen cortes laterales diseñados para conducir la SN a la capa inferior, cuando la masa de raíces está obstruyendo el canal crean pequeñas cascadas favoreciendo la oxigenación y evitando así un efecto tapón en la SN. (Urrestarazu *et al.*, 2005; Varanda, 2018; Nicola *et al.*, 2021). La SN desemboca en el canal en líneas de goteo llegando hasta el final de la línea por presión y gravedad de la canaleta multicanal interior, con una pendiente uniforme del 2%. La estructura

de los canales internos mejora la oxigenación incluso cuando los canales son largos. Después de regar y alimentar el sistema de enraizamiento, toda la SN drenada se recolecta en un tanque o cisterna de drenaje (Urrestarazu *et al.*, 2005; Nicola *et al.*, 2021).

Este método logra varios ciclos de cultivo por año, permitiendo obtener productos de calidad y limpios, listos para el consumo en fresco (Varanda, 2018).

### 1.12.3.- Raíz flotante

El sistema de raíz flotante no requiere de sustrato y las raíces de las plantas crecen directamente en la SN (Villacrés, 2019; Flores-Rondon, 2020), es la técnica más utilizada en hidroponía, consta de recipientes, donde se incluye la solución nutritiva y sobre ella se encuentra suspendida planchas de poliestireno de alta densidad, que sirven de soporte para la planta (Guanoluisa, 2014; Ricardo, 2019; Villacrés, 2019), es llamado así porque las raíces siempre permanecen sumergidas en la SN y la parte aérea es sostenida por la plancha flotante (Zambrano, 2014).

El diseño general consiste en la disposición de la SN en una cama, la cual está conectada por medio de un sistema de tubería a un tanque donde la SN recircula de la cama al tanque, ya que es por este medio que se exógena la solución (Guanoluisa, 2014) y en este caso el contenedor no debe perforarse agujero de desagüe (Villacrés, 2019). Las plantas se adaptan bajo condiciones cerradas controlando el pH, CE y los nutrientes para evitar problemas de crecimiento y desarrollo y así no desperdiciar el agua (Guanoluisa, 2014; Flores-Rondon, 2020).

Ésta técnica consiste básicamente en trasplantar las plántulas sobre largas superficies de poliestireno (Villacrés, 2019), es decir una vez que se obtienen las plántulas, se debe eliminar cualquier resto de sustrato que traiga la raíz, y se coloca hule espuma alrededor del tallo; luego se coloca sobre la plataforma flotante. La plataforma tiene orificios por los cuales la raíz puede llegar hasta el agua, los cuales deben ser de 5 o 7.5 cm de diámetro, aproximadamente (Zambrano, 2014). Este sistema permite obtener producciones automatizadas, y si se cuenta con las

herramientas adecuadas requerirá de cuidados mínimos y el tiempo de cosecha de la mayoría de los cultivos se verá acelerado (Villacrés, 2019).

La ventaja de este sistema es que permite optimizar el crecimiento y desarrollo de la planta haciendo eficiente el uso del agua, además de un buen control fitosanitario e inocuidad del cultivo. La desventaja radica en la SN, ya que se deben realizar cambios semanales o al menos renovar parte de ella, puede haber presencia de algas, posible desbalance y necesidad de airear el sistema (Villacrés, 2019; Flores-Rondon, 2020). La falta de oxígeno presenta raíces oscuras, pero se puede solucionar generando burbujas con inyección de aire o agitando diariamente de manera manual, para que la raíz capte el agua y los nutrientes necesarios para su desarrollo (Villacrés, 2019; Ricardo, 2019).

### **1.13.- Sistema radicular y regulación hormonal**

El sistema radicular de las plantas de tomate, está compuesto por diversos tipos de células, las cuales contribuyen a que el desarrollo radicular sea un proceso más dinámico y sensible a los cambios en el ambiente, para garantizar un correcto desarrollo de la planta. Las capas de células que componen la raíz son: los haces vasculares (xilema y floema), procambium, periciclo, endodermis, córtex y epidermis (Ron *et al.*, 2013).

#### **1.13.2.- Raíz principal**

La formación de la raíz principal se establece durante la embriogénesis pero en el transcurso de la germinación, esta raíz emerge y crece de forma gravitrópica hacia el suelo, debido a su elongación producida por la división celular que se dan en el meristemo apical (Azorín, 2017) y este meristemo funciona como un centro de organización del crecimiento radicular y está constituido por células quiescentes, que permanecen indiferenciadas para seguir promoviendo las sucesivas divisiones celulares del resto de células (Verstraeten, Schotte, y Geelen, 2014).

#### **1.13.3.- Raíces laterales**

De la raíz principal surgen las raíces laterales (Nibau, Gibbs, y Coates, 2008) y se desarrollan a partir de tres filas de células del periciclo en el polo del xilema

(Casimiro *et al.*, 2003). Por lo que en estas células fundadoras del xilema se reactiva el ciclo celular y se inicia un primordio de raíz lateral (De Smet, 2012). En la formación del primordio se producen dos divisiones asimétricas, la primera llevan a la formación de una única capa de primordio y la segunda las divisiones periclinales posteriores terminan de conformar el primordio de la raíz lateral (Benková y Bielach, 2010).

#### 1.13.4.- Raíces adventicias

Las raíces adventicias se desarrollan en tejidos no radicales, sobre todo en partes aéreas como hipocótilos, hojas o tallos (Verstraeten, Schotte, y Geelen, 2014), por lo que el primordio se desarrolla y emerge de callos indiferenciados, o a partir de la reprogramación de células residentes, aún no se conoce con exactitud el origen celular, pero varios tejidos han sido propuestos como fuente de las células formadoras, tales como el cambium (Naija *et al.*, 2008; Bellini, Pacurar, y Perrone, 2014). Su formación es un proceso complejo en el que influyen múltiples factores endógenos y exógenos, entre los que se encuentran las hormonas, la intensidad lumínica, las heridas, el estrés entre otros (Verstraeten, Schotte, y Geelen, 2014).

#### 1.13.5.- Regulación hormonal en la formación de raíces

El sistema radicular puede ser afectado por los cambios en los factores bióticos y abióticos, teniendo repercusiones en el desarrollo de la planta, es decir, estos cambios pueden afectar al sistema radicular, debido a una alteración del transporte de los factores endógenos; como el papel que juegan las hormonas en la regulación del desarrollo radicular (Bellini, Pacurar, y Perrone, 2014).

La hormona principal es la auxina, que participa en múltiples procesos dentro del desarrollo normal de la planta. En el desarrollo radicular, en concreto, participan en etapas tan importantes como la iniciación y el proceso de emergencia, la formación del patrón del meristemo apical, el gravitropismo y la elongación, siendo claves para el desarrollo de las raíces laterales y adventicias (Pop, Pamfil, y Bellini, 2011).

Al igual las citoquinina es una hormona requerida en el proceso de división celular y en el desarrollo de los tallos, siendo antagonistas de las auxinas y por tanto

suprimiendo la formación de raíces laterales y adventicias (Bellini, Pacurar, y Perrone, 2014). Esta hormona promueve una modificación de la expresión de los transportadores polares de auxinas, impidiendo de este modo la formación del gradiente de auxinas necesario para la formación del primordio de la raíz lateral (Laplace *et al.*, 2007). Una disminución en los niveles de citoquininas, aumenta la formación de raíces laterales y adventicias (Werner *et al.*, 2003).

#### **1.14.- Movimiento del agua y nutrientes en la planta**

El agua es el constituyente más abundante de una planta, siendo el mejor disolvente conocido, es fundamental para la nutrición e imprescindible para muchas reacciones biológicas. Sin embargo, es un residente temporario, porque está continuamente tomado del suelo y perdido a la atmósfera. Este proceso de pérdida se llama transpiración y permite mantener un organismo vivo dentro de los límites de temperatura aptos para su funcionamiento. El calor específico, es lo que asegura suaves fluctuaciones de temperatura. La absorción de agua es a la vez el único medio de importar minerales. Se puede decir que la planta es una columna de retención, por la que deben pasar muchos litros de agua para poder interceptar los nutrientes necesarios (Romero, 1996).

En las plantas, el movimiento del agua entre dos puntos es posible cuando existe una diferencia en el potencial hídrico. El potencial hídrico es más elevado en las raíces, disminuyendo a lo largo del tallo y con los valores más bajos en las hojas, de esta forma se explica, el movimiento del agua de una célula a otra y el movimiento desde las raíces, a través del tallo y hasta llegar a las hojas más altas (Beltrano y Giménez, 2015), es decir, el agua viaja desde las zonas donde el potencial hídrico es mayor (menos negativo) hacia las zonas donde este es menor (más negativo) (Moreno, 2009; Beltrano y Giménez, 2015).

#### **1.15.- Suelo-planta-atmósfera**

El agua se mueve a través del suelo, penetra al interior de las raíces y se adentra a lo largo de la parte aérea; donde casi, la totalidad pasa a la atmósfera por el proceso de transpiración, es decir, en su conjunto, el agua del suelo, planta y atmósfera forman un constituyente continuo, donde el agua se desplaza de acuerdo a

gradientes de energía, considerando el movimiento del agua desde el suelo hacia las raíces, a través de la planta y hacia el aire, como una serie de procesos estrechamente interrelacionados, siendo de naturaleza física, no utilizando de forma directa la energía metabólica de la planta (Beltrano y Giménez, 2015).

#### 1.15.2.- Absorción (raíces)

El contacto del agua y los nutrientes con la superficie de la raíz es necesario para que se produzca la absorción, ya sea por difusión o flujo másico, o por el crecimiento de las raíces, pero solo un pequeño porcentaje del total de nutrientes es absorbido por esta vía. La mayor cantidad de los nutrientes se mueve por difusión y flujo másico. La difusión, es cuando se crea un gradiente de concentración de nutrientes entre el suelo y la raíz, lo que genera un movimiento de nutrientes hacia las raíces, la cantidad transportada va a estar relacionada con el gradiente de concentración y con el coeficiente de difusión, el porcentaje de nutrientes absorbidos varía de acuerdo con el nutriente en cuestión. El flujo másico es el movimiento de agua y de los nutrientes que se encuentran disueltos en la masa líquida que llega hasta las raíces por el proceso de transpiración, la cantidad de nutrientes que llega por este movimiento está relacionada con la concentración y con el volumen de agua que absorbe la planta (Sepúlveda, Loera, y Sepúlveda, 2015).

Entonces, el agua y nutrientes se moverán con facilidad hacia las raíces siguiendo un gradiente decreciente de potencial hídrico. Una vez que el agua ingresa por los pelos radicales, puede moverse por dos vías principales, la apoplástica y la simplástica. La vía apoplástica es aquella que comprende los espacios intercelulares de todos los tejidos, las paredes de las células y el xilema, presentando menor resistencia al pasaje de agua y nutrientes. Mientras que en la vía simplástica el agua y nutrientes pueden ingresar a la célula, atravesando la pared celular y la membrana plasmática, moviéndose de célula a célula vía plasmodesmos uniendo los citoplasmas y de esta forma la resistencia al flujo de agua y nutrientes es mayor (Beltrano y Giménez, 2015; Ramírez y Martínez, 2016).

El agua y los nutrientes pueden penetrar y moverse radialmente hacia el centro de la raíz, ya sea por una vía o por otra (Beltrano y Giménez, 2015). Siguiendo la vía

apoplástica, el agua y los nutrientes atraviesan la epidermis y la corteza hasta la endodermis vía apoplasto, a llegar a la endodermis el movimiento no puede continuar esta vía, debido a la presencia de las bandas de Caspary que obliga al agua y los nutrientes a penetrar al citoplasma de las células de la endodermis y continuar vía simplasto hasta la estela, donde pasarán al xilema de la raíz. En la vía simplástica, el agua y los nutrientes pueden penetrar directamente al simplasto de la raíz a través de los pelos radicales y continúan vía simplasto hasta la estela de la raíz y pasar al xilema de la raíz (Díaz, 1996).

### 1.15.3.- Transporte (tallos)

Una vez que el agua y nutrientes han llegado al xilema de la raíz, se inicia el movimiento ascendente, en la corriente de transpiración. Existen dos modelos que explican este movimiento; la presión radical y la cohesión. La presión radical explica el movimiento del agua en plantas que miden menos de 10 m, donde las células del periciclo y parénquima bombean activamente (gasto de energía) iones a el xilema, para que el potencial osmótico disminuya y genere una presión osmótica necesaria para que el agua entre al xilema y ascienda. La cohesión se basa en tres elementos fundamentales: en la fuerza motriz, fuerza de adhesión y fuerza de cohesión, y explica que cuando una molécula de agua se evapora de la hoja, la fuerza de tensión se transmite a lo largo de toda la planta hasta el suelo y el agua asciende, contribuyendo a generar el gradiente de potencial hídrico, aunque en la hoja o en los puntos de crecimiento es suficiente para producir este gradiente (Díaz, 1996).

Al igual el suministro de agua de las raíces al tallo puede cambiar según la demanda, por ejemplo, en una planta que está transpirando activamente, la tensión ejercida en el tallo es grande y la resistencia hidráulica de la raíz es baja, y se facilita la absorción de agua y nutrientes con el aumento de la demanda. En cambio, en situaciones donde no se produce transpiración, por ejemplo, durante la noche y ante una resistencia hidráulica de la raíz elevada, el suministro de agua y nutrientes que asciende por el tallo será marcadamente menor (Beltrano y Giménez, 2015).

Contrariamente a lo que ocurre en la raíz, en el xilema la resistencia al pasaje del agua es muy baja, dada la anatomía de este tejido. Las células conductoras del

xilema tienen una anatomía especializada que permite el transporte de grandes cantidades de agua con una gran eficiencia (Beltrano y Giménez, 2015). Esta resistencia también puede aumentar al disminuir el diámetro de los conductos y al aumentar la longitud del recorrido, es por ello que las características estructurales de los elementos xilemáticos también influyen en la resistencia al movimiento de agua (Faustino *et al.*, 2011). Las células conductoras de la xilema están formadas por vasos o tráqueas y por traqueidas.

Cada vaso o tráquea está formado por varios elementos o células que al llegar al estado adulto pierden su protoplasto, son células con las paredes secundarias impregnadas de lignina que confieren resistencia a la compresión, evitando que se colapsen debido a la tensión que experimentan. Las paredes secundarias no son tan permeables como las primarias, pero al formarse dejan depresiones, que son sitios delgados y porosos donde solo están separadas por las paredes primarias (Beltrano y Giménez, 2015). Los vasos normalmente son cortos y anchos, poseen placas cribosas en sus extremos con aberturas, donde la pared secundaria no se alcanzó a formar y la pared primaria y la lámina media se disuelven, que permite conectarse en sus extremos de un modo directo, generando caminos hidráulicos sin restricciones intermedias, llegando a alcanzar varios metros de longitud formando elementos contiguos (Gil *et al.*, 2005; Beltrano y Giménez, 2015).

Las traqueidas son los restos lignificados de células alargadas que se conectan en sus partes finales a través de espacios ricos en punteaduras, por las que necesariamente debe circular el agua a lo largo de su camino (Gil *et al.*, 2005). Sus depresiones se encuentran en los extremos, permitiendo que el agua ascienda de una traqueida a la siguiente, y de esta manera forman filas de células. Las traqueidas son células sin perforaciones, que presentan pares de puntuaciones areoladas en sus paredes comunes. Son células muertas, alargadas, con los extremos aguzados y una cavidad interior o lumen bastante amplio. En la mayoría de las plantas, el xilema es el camino más largo para el movimiento del agua, aunque comparado con el pasaje a través de la raíz, es más simple y con una menor resistencia al flujo (Beltrano y Giménez, 2015).

#### 1.15.4.- Transpiración (hojas)

Una vez que el agua llega a la hojas, pueden pasar dos cosas, que se evapore a través de los estomas por la transpiración o que penetren a las células del mesófilo para constituirse en parte integral del citosol o para ser metabolizada en los diferentes procesos de las células de la hojas, mientras que los nutrientes penetran a la célula donde pueden ser metabolizados o ser almacenados en la vacuola, también pueden pasar al floema para ser enviados a los órganos demanda o vertederos, siempre y cuando se trate de elementos con buena movilidad en el floema (Díaz, 1996).

La transpiración es la pérdida de agua en forma de vapor, que se produce en las plantas, a través de los estomas hacia la atmósfera (Beltrano y Giménez, 2015), cerca del 90% del agua que entra por las raíces se pierde al aire en forma de vapor (Olalla, López, y Calera, 2005).

La transformación de líquido a vapor ocurre en las paredes celulares expuestas a los espacios de aire del mesófilo. La pared celular en general está empapada de agua, con un potencial próximo a cero. El aire colindante tiene un potencial más reducido, debido a que se encuentra normalmente no saturado. Esta diferencia de potencial entre el agua líquida de las paredes y la fase de vapor adyacente, provoca la evaporación. El vapor de agua se difunde hacia las cavidades subestomáticas y sale a la atmósfera por los estomas. Entonces se puede decir que la transpiración es la salida de vapor de agua a través de los estomas como resultado de la diferencia de potencial agua entre las hojas y el aire, es un proceso físico e inevitable para la planta (Beltrano y Giménez, 2015).

La apertura y cierre de los estomas es la forma que tienen las plantas de regular la pérdida de agua. En la noche, cuando no hay fotosíntesis y se acumula  $\text{CO}_2$ , los estomas se cierran impidiendo la pérdida de agua. A la mañana, con el aumento de la radiación aumenta también la fotosíntesis y la demanda de  $\text{CO}_2$ ; y cuando se disminuye la concentración de  $\text{CO}_2$  en la cámara subestomática, los estomas se abren y se produce la pérdida de agua por transpiración (Beltrano y Giménez, 2015). La conductancia estomática regula a la vez las pérdidas de vapor de agua y el

ingreso de CO<sub>2</sub>, por lo que su función es no solamente minimizar la transpiración, sino también maximizar la fotosíntesis (Romero, 1996).

### **1.16.- Fotosíntesis**

Todos los productos que se obtienen de la horticultura surgen a partir de la fotosíntesis, este proceso se realiza en las hojas, con la fijación CO<sub>2</sub> de la atmósfera, la energía del sol y el agua del suelo (Contreras, 2014). Dentro del metabolismo primario de las plantas, la fotosíntesis es un proceso de suma importancia porque convierte la energía lumínica en energía química, que aprovecha para su crecimiento y desarrollo, es por eso que una reducción de intensidad lumínica afecta estos procesos, sobre todo la inducción floral, su diferenciación, el cuajado, el tamaño, el color y la calidad de los frutos con menor grado el crecimiento (Deaquiz, 2014). La fotosíntesis es el proceso que más contribuye a la producción de biomasa, para mejorarla es necesario mejorar otros procesos que permitan reducir los gastos de energía y la tasa de respiración e incrementar el uso eficiente de los nutrientes, así como realizar cambios morfológicos en la arquitectura de la planta (Ligarreto, 2013).

El rendimiento y la calidad del tomate dependen de la fotosíntesis, ya que los carbohidratos, producto de la fijación del CO<sub>2</sub>, queda disponible para su crecimiento vegetativo y para su producción. La fotosíntesis depende de diversos factores climáticos, como la luz, la temperatura y el agua disponible, que puede modificar el horticultor, manipulando diversos factores de cultivo como el injerto, el sistema de poda y conducción, la orientación de las camas, el espaciamiento entre plantas y entre camas, la utilización de sistemas de riego, entre otras, ya que estas decisiones permiten manipular los microclimas luminoso, térmico e higrométrico del cultivo (Contreras, 2014).

La fotosíntesis es el proceso de síntesis de carbohidratos a partir de sustancias inorgánicas en plantas pigmentadas con la ayuda de la energía solar (Song, 2012). En la cual se pueden distinguir dos fases: una primera de absorción y conversión de energía y otra de toma y asimilación de elementos constituyentes de la materia orgánica. A la primera fase se le denomina fase luminosa, fase fotoquímica o

reacción de Hill y tiene lugar en el tilacoide produciendo NADPH<sub>2</sub> y ATP; y a la segunda se le denomina fase oscura o ciclo de Calvin, tiene lugar en el estroma y produce carbohidratos (Song, 2012; Contreras, 2014).

#### 1.16.2.- Fase luminosa

La luz induce una transferencia de electrones vectorial que requiere la cooperación de dos tipos de fotosistemas llamados II y I (PSII y PSI) los cuales funcionan como una maquinaria fotoeléctrica, aquí el agua es usada como donador de electrones que induce una separación de cargas en el PSII, con la liberación de O<sub>2</sub> como bioproducto. Tanto el PSII como el PSI tienen su propio centro de pigmentos antena formados por clorofila (chl a P680 y chl a P700) y moléculas de carotenoides (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010) Los cuatro complejos que permiten la fotosíntesis se distribuyen en el cloroplasto: PSII en el grana, PSI en las lamelas, ATP sintasa en las lamelas y el complejo de citocromo en el grana y sus márgenes (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010; Pérez-Urria, 2009)

El agua es el donador primario de e<sup>-</sup> y el NADP<sup>+</sup> es el último aceptor de e<sup>-</sup>. El flujo de electrones entre ambos fotosistemas no es directo, sino que pasa a través de los transportadores de e<sup>-</sup> que son sistemas redox que se interponen por tanto entre el H<sub>2</sub>O y el NADP<sup>+</sup> (Pérez-Urria, 2009).

Comienza con la clorofila excitada del PSII (P680) transfiriendo un e<sup>-</sup> a la feofitina que es una clorofila en la que el átomo de Mg es sustituido por dos átomos de H. La feofitina cede e<sup>-</sup> de forma secuencial a dos plastoquinonas QA y QB, moléculas de pequeño tamaño unidas al centro de reacción, formando plastohidroquinona reducida o QH<sub>2</sub> (Pérez-Urria, 2009).

La QH<sub>2</sub> transfiere sus e<sup>-</sup> al complejo citocromo b<sub>6</sub>f (2 cit b y un cit f) que es una proteína de gran tamaño formada por múltiples subunidades con numerosos grupos prostéticos, este complejo contiene una proteína ferrosulfurada de Rieske donde dos átomos de Fe están unidos por dos átomos de S (FeSR). Cuando QH<sub>2</sub> cede sus e<sup>-</sup> se oxida: transfiriendo uno de los e<sup>-</sup> a la FeSR oxidada y después lo transfiere al cit f. A continuación, el cit f transfiere el e<sup>-</sup> a la plastocianina (PC), mientras que el

otro  $e^-$  es transferido al cit b, liberando 2 protones al lumen. La PC es una proteína soluble, de pequeño tamaño, contiene cobre, se encuentra en el lumen y transfiere  $e^-$  entre el cit b6f y el P700 (Pérez-Urria, 2009)

El PSI (P700) cede el  $e^-$  a su primer aceptor A0 (clorofila) y el siguiente aceptor A1 (quinona). Después intervienen tres proteínas ferrosulfuradas asociadas a la membrana denominadas centros ferrosulfurados: FeSX, FeSA y FeSB. Posteriormente los  $e^-$  son transferidos a la ferredoxina soluble (Fd). Por último, la ferredoxina-NADP reductasa (FNR), que es una flavoproteína soluble asociada a la membrana, reduce el  $NADP^+$  a NADPH. Completando así el transporte de  $e^-$  no cíclico, que inicia con la oxidación del agua terminando con la formación de NADPH (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010; Pérez-Urria, 2009).

La ATP sintasa es una enzima que consta de dos partes: del CFo (hidrofóbica) que está unida a la membrana y CF1 (hidrofílica) que es la parte en el estroma que sintetiza ATP. La distribución desigual de los complejos proteicos en el tilacoide, es importante porque evidentemente los  $H^+$  en el lumen deben desplazarse hasta alcanzar la ATP sintasa. El flujo de  $e^-$  genera un transporte de  $H^+$  que hacen que éstos se acumulen en el lumen haciéndolo más ácido (más  $H^+$ ) y haciendo el estroma más alcalino (menos  $H^+$ ), esta diferencia de concentración de protones es la fuente de energía que se dirige para la síntesis de ATP ( $4H^+$  por ATP). El complejo ATP sintasa está altamente regulado para que no se produzca hidrólisis continua de ATP, se inactiva en oscuridad y puede ser activado por un gradiente de protones o por la luz (Pérez-Urria, 2009).

### 1.16.3.- Fase oscura o ciclo de Calvin

Es la segunda reacción e implica reducción y fijación de  $CO_2$  a moléculas orgánicas con la utilización de subproductos de la primera reacción. El ciclo de Calvin representa la ruta central de la reducción del  $CO_2$  (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010).

Comienza cuando el aceptor ribulosa-1,5-bisfosfato (RuB-P) realiza la carboxilación del  $CO_2$  en la enzima Ribulosa 1-5 bifosfato carboxilasa oxigenasa (Rubisco). Por

cada molécula de CO<sub>2</sub> que se fija forma dos moléculas de 3-fosfoglicerato (una triosa) formando un total de 6C (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010; Pérez-Urria, 2009).

A continuación, se produce la etapa de reducción de 3-fosfoglicerato a gliceraldehído-3-fosfato (G3P), una triosa precursora de la regeneración de RuB-P y de la síntesis de sacarosa y almidón (Solarte, Moreno, y Melgarejo, 2010). La reducción de 3-fosfoglicerato a G3P es un proceso inverso al que tiene lugar en la glicolisis, requiere del ATP y el NADPH generados en la fase luminosa. El ATP participa en la fosforilación inicial de 3-fosfoglicerato, reacción catalizada por fosfoglicerato quinasa que produce 1,3-difosfoglicerato, siguiendo la reducción catalizada por la gliceraldehído-3-fosfato deshidrogenasa ajustada a la oxidación de NADPH. El G3P se interconvierten en dihidroxi-acetona fosfato (DHAP) activado por la luz (Pérez-Urria, 2009).

Después del G3P se inicia la etapa de regeneración del RuB-P mediante varias interconversiones. El DHAP se puede condensar con G3P o con eritrosa-4-fosfato en reacciones catalizadas por aldolasas. En el primer caso del G3P se forma fructosa-1,6-difosfato y con la eritrosa-4-fosfato se forma sedoheptulosa-1,7-difosfato. Dos fosfatasaes específicas convierten estas formas difosfato de azúcares en los correspondientes fructosa-6-fosfato y sedoheptulosa-7-fosfato. Las transcetolasas transfieren un fragmento de 2C (gliceraldehído) desde la sedoheptulosa-7-fosfato y desde la fructosa-6-fosfato al G3P, formando pentosas de xilulosa-5-fosfato y ribosa-5-fosfato, que se convierten en ribulosa-5-fosfato por medio de dos enzimas que son la ribulosa-5-fosfato-3-epimerasa y ribulosa-5-fosfato-isomerasa respectivamente. Finalmente, la ribulosa-5-fosfato se convierte en ribulosa-1,5-difosfato en una reacción catalizada por la enzima ribulosa-5-fosfato quinasa y con ATP (Pérez-Urria, 2009).

La síntesis de almidón y sacarosa se produce en el cloroplasto y el citosol. La salida de triosas-fosfato (triosas-P) del cloroplasto al citosol está mediada por un transportador de Pi que mediante un mecanismo de contra-transporte intercambian moléculas de ortofosfato (Pi), de esta forma se permite la captación continuada de

E luminosa y la síntesis de ATP que precisa Pi. Cuando la concentración de Pi en el citosol es alta, las triosas-P del cloroplasto se exportan al citosol para la síntesis de sacarosa y cuando la concentración citosólica de Pi es baja, las triosas-P son retenidas en el cloroplasto y se sintetiza almidón. Por lo que, en el citosol, las triosas-P se convierten en hexosas-fosfato y finalmente, en sacarosa, mientras que el almidón es una reserva que permite la síntesis continuada de sacarosa durante la noche, cuando no se producen triosas-P por el ciclo de Calvin. Las concentraciones relativas de triosas-P y Pi son los elementos que controlan si el C fijado por fotosíntesis se canaliza hacia la síntesis de sacarosa en el citosol o de almidón en el cloroplasto (Ragel, 2012; Carril, 2011).

### **1.17.- Formación del fruto**

#### 1.17.2.- Fecundación

El proceso de fecundación comprende tres fases (Guanoluisa, 2014):

Fase 1: Después de la iniciación de la primera flor, comienza la formación del grano de polen con la microsporogénesis. Cada una de las células madre de las microsporas se divide por meiosis en el saco polínico, dando como resultado una tétrada de microsporas haploides. La meiosis se produce entre 8 y 9 días antes de la antesis (Guanoluisa, 2014; Sato, Peet y Thomas, 2002). Cada microspora que conforma la tétrada se convertirá en un grano de polen. El núcleo de cada microspora es desplazado por una vacuola central y se divide por mitosis para formar un núcleo vegetativo y un núcleo generativo. El polen alcanza su madurez en los 4 días siguientes a la antesis (Guanoluisa, 2014; Hesse *et al.*, 2009).

La cantidad de los granos de polen producidos, así como su calidad se ve afectada por condiciones ambientales adversas (Sato Peet y Thomas 2000; Ploeg y Heuvelink, 2005). Con altas temperaturas, la meiosis es anormal y no se metabolizan los hidratos de carbono por la incapacidad de los granos de polen para almacenar almidón, lo que dificulta su desarrollo (Heuvelink y Okello, 2018).

Fase 2: La polinización es la transferencia de los granos de polen a la superficie del estigma. El polen es liberado de 1 ó 2 días después de la antesis, en el momento

que se lleva a cabo la dehiscencia de la antera y se traslada a la superficie del estigma, permaneciendo receptivo 2 días antes y 4 días después de la anthesis (Guanoluisa, 2014). Una vez en la superficie del estigma se produce la germinación del grano de polen, proceso que es sensible a las altas temperaturas ya que disminuye el tiempo de germinación (Nuez, Gil, y Costa, 2003; Vallejo y Estrada, 2004).

Un factor importante que determina la polinización exitosa es la longitud del estilo, dando un resultado óptimo cuando el estilo se ubica a la misma altura o por encima del estigma. Una alta temperatura e iluminación deficiente pueden ocasionar una excursión estigmática, provocando que los granos de polen no lleguen a la superficie del estigma, como consecuencia se tiene una desecación y aborto de la flor por falta de fecundación (Heuvelink y Okello, 2018).

Fase 3: La fecundación se realiza cuando el tubo polínico penetra en el saco embrionario y los núcleos gaméticos realizan la doble fecundación. Es un proceso sensible a altas temperaturas ya que puede dañar al óvulo cuando se está dividiendo por mitosis en el estado de macrospora 9 días antes de la anthesis (Guanoluisa, 2014; Heuvelink y Okello, 2018).

#### 1.17.3.- Cuajado

Después de llevarse a cabo la fecundación, las células que forman el pericarpio aumentan de tamaño, los lóculos crecen alrededor de los óvulos y la placenta crece dentro de cada lóculo protegiendo a las semillas. En este proceso, se pueden presentar varias anomalías, debido a alteraciones en la polinización que a su vez se producen por condiciones ambientales como baja iluminación, limitado movimiento de la estructura vegetal o excesiva fertilización (Guanoluisa, 2014).

#### 1.17.4.- Crecimiento

El crecimiento del fruto comprende tres fases y tiene un comportamiento similar al de una curva sigmoidea (Guanoluisa, 2014; Heuvelink y Okello, 2018).

Fase 1: se caracteriza por tener un crecimiento lento por la división celular, alcanzando el máximo número de células posibles, durando de 1 a 2 semanas, al final el peso del fruto es menor al 10% del peso total.

Fase 2: se presenta un rápido crecimiento debido a la expansión celular, al final el fruto logra su máximo tamaño y dura de 3 a 5 semanas,

Fase 3: el crecimiento es mínimo, es aquí donde se producen cambios metabólicos correspondientes a la maduración y dura 2 semanas. Al inicio se produce un aumento brusco de etileno, que se manifiestan sobre cambios en las características organolépticas (Power y Bennett, 2002) y durante este proceso aumenta el contenido de azúcar soluble y de compuestos volátiles, mientras que la acidez total disminuye, es así que los cambios en el sabor y aroma se atribuyen a estos parámetros (Guanoluisa, 2014; Luna y Delgado, 2014), mientras que el cambio de color se atribuyen a la formación de compuestos carotenoides que simultáneamente degradan la clorofila (Luna y Delgado, 2014) y la pérdida de firmeza está asociada a la degradación y solubilización de la pared celular por las enzimas poligalacturonasa, pectinesterasa y pectato liasa (San Martín *et al.*, 2012).

### **III.- MATERIALES Y METODOS**

#### **3.1.- Lugar del experimento**

El estudio se realizó en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, en el área experimental del Departamento de Horticultura, con las coordenadas 25°21'21.7" Latitud Norte y 101°02'06.7" Longitud Oeste, a una altitud de 1764 msnm.

El invernadero utilizado es de tipo túnel, su estructura es metálica, sus paredes están cubiertas de fibra de vidrio y el techo de cubierta plástica, cuenta con un sistema de enfriamiento mediante pared húmeda y extractores de ventilación automatizados.

#### **3.2.- Material vegetal y establecimiento del experimento**

Para este experimento se utilizó semilla de tomate tipo saladette de la variedad EL CID F1 de crecimiento indeterminado. La germinación se llevó a cabo el día 2 de febrero de 2021, en charolas de poliestireno de 200 cavidades, utilizando peat moss como sustrato. El trasplante se realizó el 16 de marzo del mismo año, con una densidad de población de 6 plantas·m<sup>-2</sup>. Las plantas se guiaron a un solo tallo, tutorando con hilo de rafia que se sujetó a la parte superior de la estructura del invernadero. Se aplicó una Solución Nutritiva Steiner modificada (Cuadro 1) según la etapa fenológica del cultivo (Steiner, 1984), manteniendo un pH de 5.5 y una conductividad eléctrica (CE) de 2,5 dS m<sup>-1</sup>. Se realizó un registro de las temperaturas máximas, mínimas y promedio, durante el experimento (marzo-noviembre 2021), así como la humedad relativa (HR) y radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Cuadro 2). Se realizaron labores culturales correspondientes al cultivo, como el deshoje, deschuponado y raleo de flores, dejando 6 frutos por racimo.

**Tabla 1.** Concentración de iones en la solución nutritiva de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo de tomate.

	Desarrollo vegetativo	Fructificación	Todo el ciclo	
	Macroelementos (me L <sup>-1</sup> )		Microelementos (mg L <sup>-1</sup> )	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7	12	Fe	2
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1.5	1.5	Mn	0.5
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	3.5	6.5	Cu	0.03
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	Zn	0.14
Cl <sup>-</sup>	-	-	B	0.5
Ca <sup>++</sup>	6	9	Mo	0.05
K <sup>+</sup>	3.5	7		
Mg <sup>++</sup>	2	3.5		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.5	0.5		
Na <sup>+</sup>	-	-		

**Tabla 2.** Datos máximos, mínimos y promedios de temperatura, humedad relativa y radiación fotosintéticamente activa (PAR) durante los meses marzo a noviembre.

Mes	PAR Light (μM/m <sup>2</sup> s)			Humedad Relativa (%)			Temperatura (°C)		
	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima
Marzo	425	826	24	47	85	8	24	38	9
Abril	456	888	24	52	87	16	25	38	11
Mayo	484	944	25	52	87	17	28	41	14
Junio	442	856	29	56	88	25	26	37	15
Julio	504	984	24	62	87	37	21	27	15
Agosto	621	1220	22	63	90	37	21	28	15
Septiembre	421	824	18	69	91	47	20	26	14
Octubre	341	663	20	67	92	43	18	24	12
Noviembre	295	574	17	63	91	36	16	23	10

### 3.3.- Descripción de los tratamientos

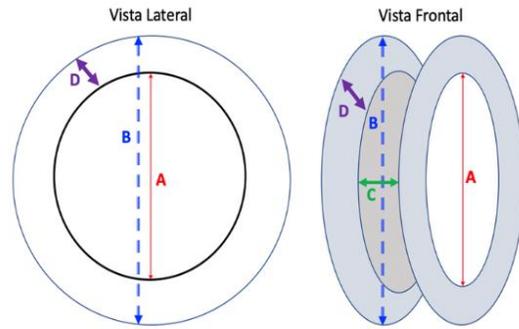
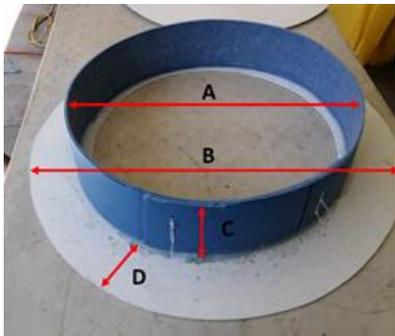
Los tratamientos (T) consistieron en dos sistemas de producción hidropónicos:

T1: Sistema en bolsa con sustrato y T2: Sistema NFT modificado en Carrete

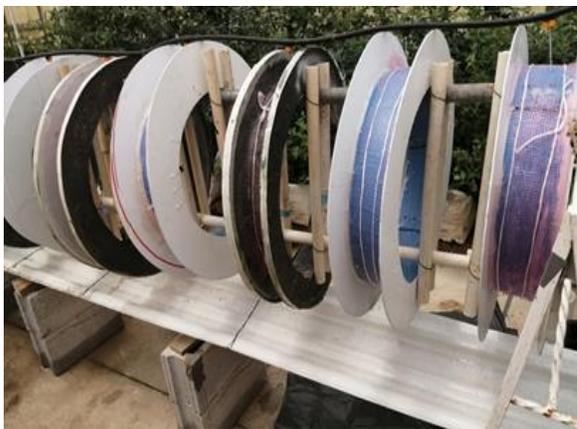
Las plantas testigo (T1) se emplearon bolsas de polietileno color negro de 20 L de capacidad, con un medio de cultivo compuesto de perlita y peat moss en proporción

de 3:1 (v/v) como sustrato. Se colocaron 2 plantas por bolsa y 3 bolsas m<sup>-2</sup>. Se utilizó un sistema de riego por goteo para proporcionar tres riegos diarios, se aplicó 0.5 L en el trasplante hasta inicio de floración y de 2 a 4 L desde la floración hasta cosecha de acuerdo a las condiciones ambientales prevalecientes en el momento y se mantuvo un drenaje promedio del 30%.

Los carretes (T2) utilizados se elaboraron manualmente con fibra de vidrio y lámina PVC espumado (vitrocel) para formar la ceja del carrete (Figura 1). Se colocaron 3 carretes m<sup>-2</sup> sobre una estructura de metal (caballetes) para sostenerlos verticalmente, debajo de los carretes se situó una lámina de fibra de vidrio con una pendiente de 2%, para la recolección de la solución nutritiva. A cada carrete en la parte central más alta, se le colocó una malla que sirvió de sostén para las plántulas (Figura 2), al momento del trasplante se removió el sustrato del cepellón y se colocaron 2 plantas por carrete dejando la raíz expuesta entre la maya (Figura 3). Se empleó un sistema de riego que permitió aplicar la solución nutritiva desde la base de las plantas y cubriendo todo el tiempo las raíces por ambos lados del carrete, empleado un sistema cerrado continuo, el riego estuvo compuesto por una bandeja de plástico de 80 L con dos bombas eléctricas sumergibles con capacidad de 600 galones por hora, cada una conectada a una manguera para riego de media pulgada de diámetro con cuatros goteros por carrete con un gasto de 3 LPH. Los carretes se cubrieron con un plástico negro para evitar que las raíces estuvieran expuestas a los rayos del sol y encima se colocó un plástico blanco para reducir la temperatura en las raíces y para reflejar la luz en las plantas. Una vez que los tallos llegaron a medir 2.5 m de longitud, se inició el enrollado de los tallos con el objetivo de mantenerlos siempre a esa altura. La parte del tallo enrollado, al quedar sin hojas y sin frutos, genera nuevas raíces adventicias en toda la parte del tallo expuesta a la solución nutritiva (Figura 4). Cuando el tallo llegó a dar dos vueltas completas en el carrete se eliminó la raíz principal y posterior a eso se fue eliminando el tallo enrollado con raíces adventicias.



**Figura 1.** Carrete utilizado para el tratamiento 1. A: diámetro interno (60 cm), B: diámetro externo (80 cm), C: base (15 cm), D: ceja (13cm).



**Figura 2.** Sistema NFT modificado en carretes.



**Figura 3.** Trasplante de plántulas en el sistema NFT modificado en carrete y en sustrato en bolsa.



**Figura 4.** Tallos enrollados en el carrete y producción de raíces adventicias.

### **3.4.- Variables evaluadas**

La evaluación de las variables de crecimiento se realizaron cada quince días, el primer punto marcado fue el 15 abril del 2021 (30 DDT) y a partir del 29 (44 DDT) de abril se comenzó a medir:

1. Longitud del tallo (LT): para determinar este dato se colocó una marca en la rafia del tutor, exactamente en donde se encontraba el meristemo apical de la planta y a los quince días se midió con una cinta métrica en cm, desde el punto marcado hasta donde se encontraba nuevamente el meristemo apical, volviendo a marcar.
2. Diámetro del tallo (DT): el punto a medir en el tallo, fue el que se marcó 15 días antes en el punto de crecimiento y con un vernier se midió el diámetro en milímetros (mm).
3. Longitud de la hoja (LH): se consideró la hoja más recientemente madura, misma que se ubicaba cerca del punto de crecimiento marcado 15 días antes, midiendo desde la base del peciolo de la hoja hasta la punta del último foliolo en la parte apical, midiendo con una cinta métrica en cm.

El rendimiento se expresó en kg producidos por planta. La cosecha dio inició el 24 de junio (100 DDT) y finalizó el 30 de noviembre de 2021 (259 DDT), el corte se realizó cuando el fruto presentó un color rojo, cosechando todos los frutos de cada planta, llevando un registro por tratamiento, repetición, No. de planta y No. de racimo. Evaluando estas variables de rendimiento:

1. Diámetro polar y ecuatorial: Con un vernier se tomó la medida del fruto de manera vertical y horizontal, las medidas se registraron en milímetros (mm).
2. Peso del fruto: se utilizó una balanza analítica marca Ohaus (precisión 0.01g) y se determinó el peso en gramos (g).
3. Número de frutos por planta: se realizó la suma total de los frutos cosechados por planta.
4. Clasificación comercial: se clasificó según a la categoría 1 (mayor a 130 g), 2 (100 - 130 g), 3 (80 - 100 g) y 4 (menores a 80 g).

Las variables de respuesta fotosintética, se midieron en hojas adultas totalmente expandidas, el día 2 de noviembre del 2021 (231 DDT), utilizando un equipo portátil marca LI-6800 (Li-COR, Lincoln, Nebraska), evaluando:

1. Asimilación neta de CO<sub>2</sub> (ACO<sub>2</sub>).
2. Transpiración foliar (THOJA).
3. Eficiencia intrínseca (ACO<sub>2</sub>/THOJA).
4. Eficiencia cuántica (Radiación fotosintéticamente activa absorbida/ACO<sub>2</sub>).

### **3.5.- Diseño experimental**

El experimento se estableció utilizando un diseño completamente al azar, para la comparación de medias se utilizó la prueba t de Welch ( $p \leq 0.05$ ) usando el programa estadístico R versión 3.3.2 (Development Core Team, 1997).

## IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Crecimiento de las plantas de tomate

En la tabla 3 se presentan las variables de crecimiento de las plantas, se observa que las medias semanales para las variables longitud de tallo (LT), longitud de hoja (LH) y diámetros de tallo (DT) no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (Welch t test  $\geq 0.05$ ). Cabe mencionar que el crecimiento vegetal es el un aumento irreversible en tamaño e implica a nivel fisiológico una serie de cambios y reacciones de tipo bioquímico, de las cuales dependerá finalmente el comportamiento agronómico y el rendimiento potencial de los diferentes genotipos; y el crecimiento está ligado a factores ambientales como luz, temperatura y humedad, entre otros (Barraza, 2004). En este estudio se empleó el mismo material vegetal para ambos sistemas hidropónicos (cultivo en carrete y sustrato en bolsa) bajo las mismas condiciones ambientales del invernadero, por lo estadísticamente la respuesta de crecimiento en ambos sistemas es muy similar en estas tres variables.

El conocimiento del proceso de crecimiento de un cultivo en un determinado ambiente representa una ventaja para su manejo agronómico. Rodríguez (2000), dice que el crecimiento de la planta se constituye en un fiel reflejo de que en ella tienen lugar una serie de cambios estructurales de tamaño, peso y forma, que ocurren de acuerdo con los patrones de división celular y diferenciación, los cuales no pueden considerarse fuera del contexto ambiental, por eso factores que afecten la radiación solar y el suministro de agua y nutrientes, es un aspecto de importante estudio en los cultivos, debido a que se encuentra directamente relacionado con eventos fisiológicos que afectan la producción y acumulación de materia seca entre los diferentes órganos.

**Tabla 3.** Parámetros de crecimiento, longitud de tallo (LT), longitud de hoja (LH) y diámetros de tallo (DT) en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato.

	Carrete			Sustrato		
	LT (cm)	LH (cm)	DT (mm)	LT (cm)	LH (cm)	DT (mm)
Crecimiento acumulado (cm) <sup>1</sup>						
Abril	33.16	31.24	8.85	32.89	29.76	9.74
Mayo	132.36	49.64	14.91	120.26	38.24	12.79
Junio	215.34	40.59	10.56	195.87	47.61	9.83
Julio	296.61	39.74	7.41	269.78	40.66	7.29
Agosto	385.25	40.30	7.95	356.24	41.71	8.39
Septiembre	482.50	42.96	11.80	451.33	43.71	10.05
Octubre	583.60	44.96	10.79	551.33	46.27	10.67
Noviembre	683.73	44.46	10.45	649.28	45.21	9.90
Crecimiento semanal (cm) <sup>2</sup>						
Promedio	23.06 a	42.59 a	9.62 a	22.28 a	43.84 a	9.8 a

<sup>1</sup>Cada dato representa la media del punto de crecimiento por semana.

<sup>2</sup>Dentro de la última fila, letras iguales a continuación de las medias indican que no hay diferencias significativas  $\alpha \leq 0.05$ , según la prueba t de Welch.

#### 4.1.2.- Longitud de tallo

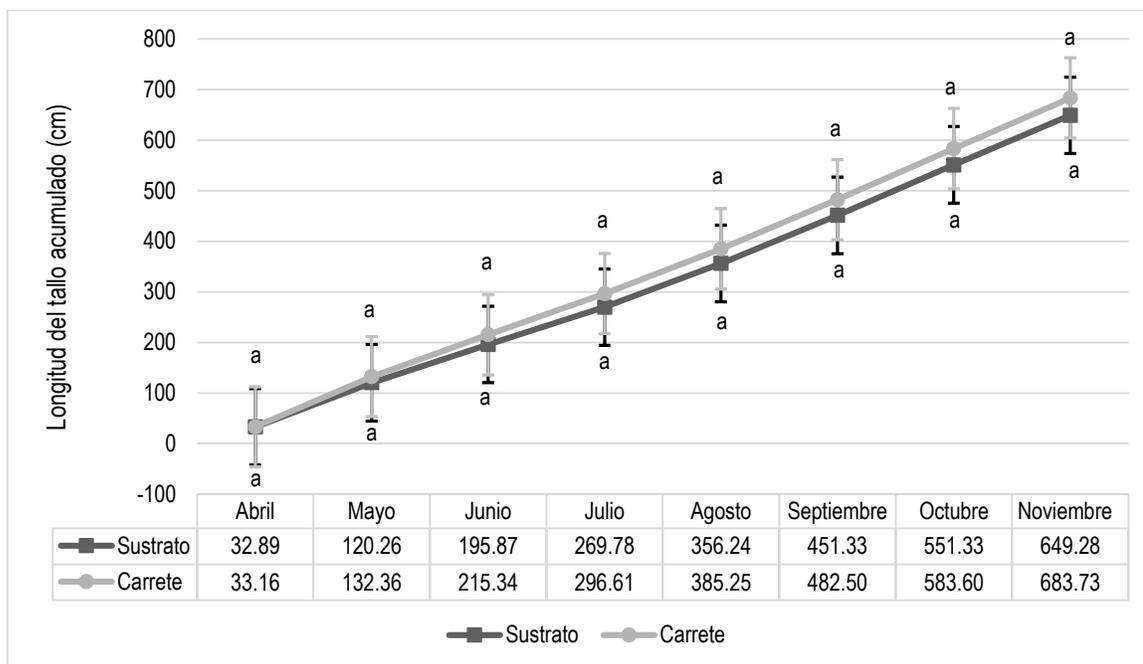
La longitud de tallo en el sistema en carrete presenta un crecimiento promedio semanal de 23.06 cm y 22.28 cm para el sistema en sustrato en bolsa, mostrando que no hay diferencia significativa entre los tratamientos (Tabla 3), ambos tratamientos se comportaron dentro del parámetro considerado como normal de 18 a 27 cm (Muñoz y Castellano, 2009). En la Figura 5 se observa el comportamiento del crecimiento acumulado de los tallos durante el ciclo del cultivo, donde el tratamiento en carrete alcanzó una mayor longitud final de 683.73 cm y el sistema en sustrato en bolsa 649.28 cm. Estos valores son similares a los obtenidos por De

la Rosa *et al* (2016), donde trabajó el mismo material vegetal alcanzando una longitud de tallo de 658 cm en un sistema hidropónico abierto.

El cultivo en carrete a partir del mes de abril comenzó a ganar altura, probablemente se debió, a que en los primeros días después del trasplante las raíces se adaptaron con mayor facilidad, ya que la temperatura en el sistema radical fue más uniforme y constante, que en las bolsas con sustrato. Sánchez-Del Castillo *et al* (2014) comenta en un estudio, que las temperaturas de la SN en un sistema NFT, el crecimiento radical y parte aérea en plantas de tomate fue favorecido con 25 °C, ya que existe una relación entre la superficie aérea y la superficie radical de la planta y a veces son equivalentes, lo que hace que la planta invierta más energía en procesos vegetativos (Bravo y Torres, 2013).

Ambos tratamientos, estuvieron bajo las mismas condiciones del invernadero, la misma densidad de plantación, se realizaron las mismas labores culturales y el mismo manejo, a excepción del cultivo en carrete, donde el tallo fue enrollado en el carrete para mantener plantas siempre cortas y el sistema de sustrato en bolsa se dejaron crecer los tallos hasta final del cultivo, aun así, el comportamiento de crecimiento del tallo fue muy similar en ambos sistemas, aunque el cultivo en carrete fue 5.3% superior.

Barraza (2004) dice que las plantas de tomate indeterminado pueden alcanzar hasta 3,5 m de altura o más, hasta donde la planta sea capaz de transportar los nutrientes y soluciones desde la raíz hasta la última hoja. Téngase en cuenta que, en este experimento, en el sistema en carrete se controló la altura de las plantas (<2.5 m). Villegas *et al* (2004), dice que si se mantienen plantas cortas se modifica el hábito de crecimiento de indeterminado a determinado, lo que permite mejorar la iluminación del dosel y aumentar la biomasa asignada al fruto.



**Figura 5.** Longitud del tallo acumulado en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa.

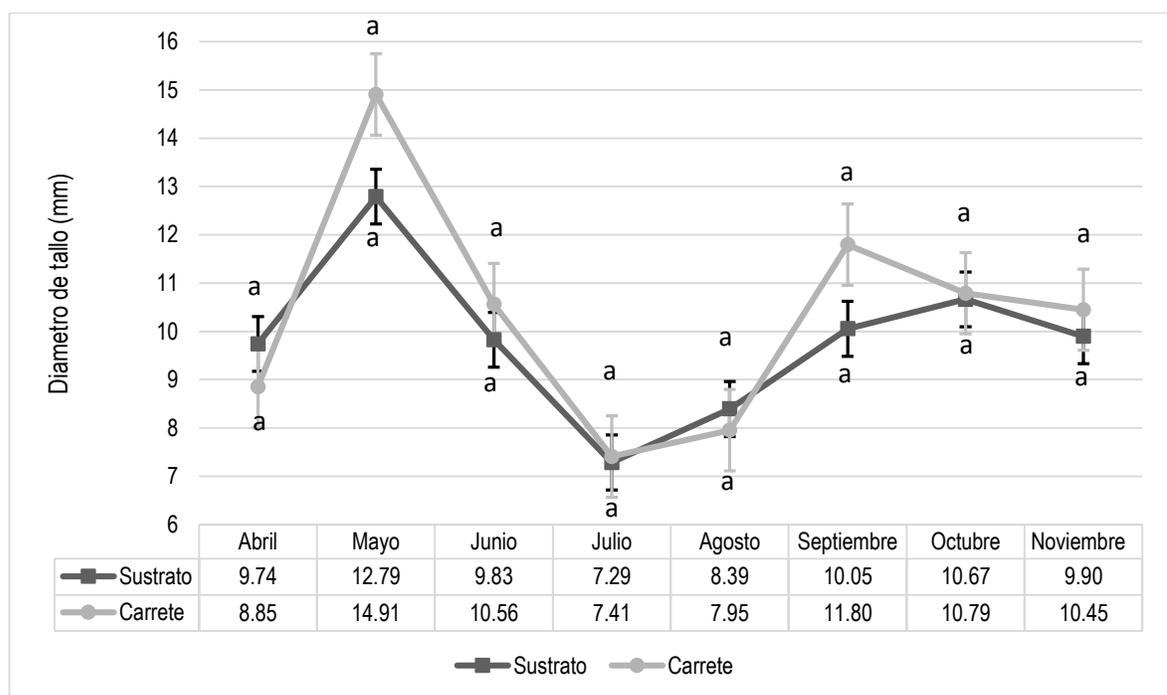
#### 4.1.3.- Diámetro de tallo

En la Figura 6, se observa el comportamiento del diámetro del tallo durante el ciclo del cultivo. Para esta variable, en el sistema en carrete se tuvo una media semanal de 9.62 mm y 9.80 mm para el sistema en sustrato, donde no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos (Tabla 3), ambos valores están por debajo de los reportados en la literatura, de acuerdo a Muñoz y Castellano (2009), el parámetro en equilibrio es de 11 y 12 mm y Ortega *et al* (2010) comenta que puede llegar hasta los 25 mm de tal forma que a mayor diámetro, incrementa el número de frutos y en consecuencia el rendimiento. Sin embargo, para De la Rosa *et al*/2016 esta variable no representó un impacto importante en la producción de la planta, al igual que en el presente estudio.

Sin embargo, el área total de tallo y sus diferentes tejidos pueden ser afectados por factores ambientales y de manejo, las temperaturas elevadas (30°C) propician el crecimiento de tallos delgados. Asimismo, luminosidades bajas dan lugar a tallos delgados y débiles. Otro factor que puede modificar la variable crecimiento es la

densidad de plantación, teniendo que, a mayor densidad menor diámetro de tallo, reflejándose también en las áreas de los diferentes tejidos (Ortega *et al.*, 2010).

Para este experimento la densidad de plantación fue de 6 plantas por metro cuadrado. Las temperaturas registradas fueron superiores a los 30°C durante la mitad del ciclo. En el mes de mayo y junio se bajó la intensidad luminosa del invernadero, pintando con cal el techo; donde se puede observar en la gráfica que el diámetro de tallo disminuyó.



**Figura 6.** Diámetro de tallo en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa.

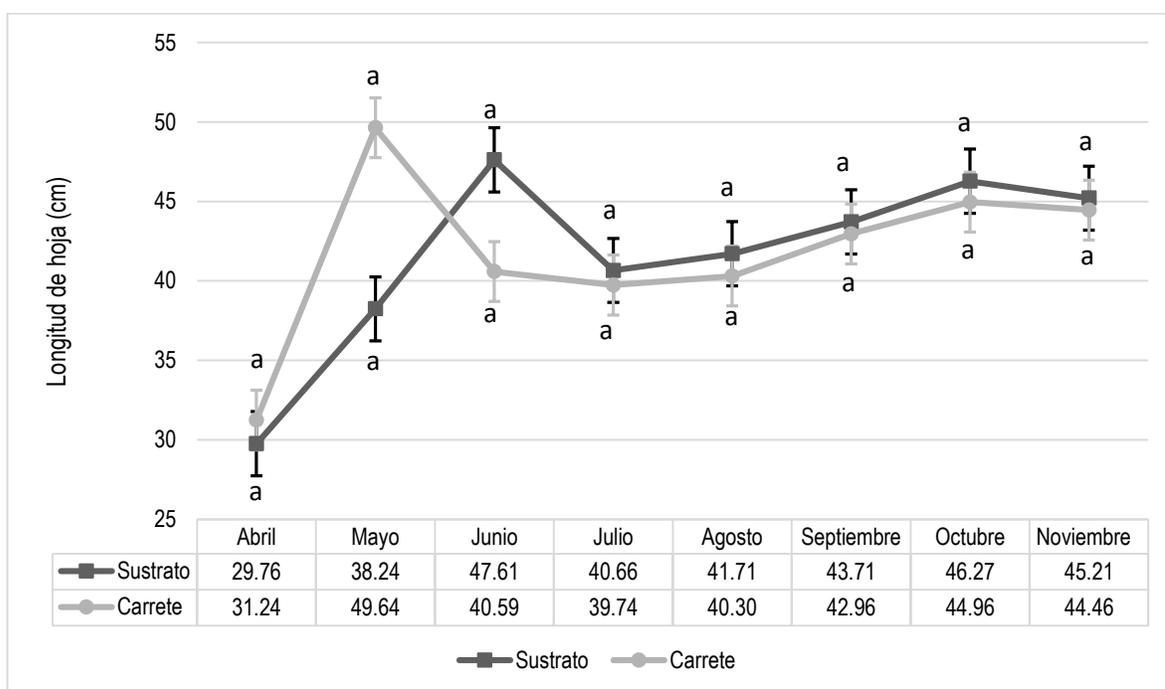
#### 4.1.4.- Longitud de hoja

Para la variable longitud de hoja, se obtuvo una media semanal de 42.59 cm en el sistema en carrete y 43.84 cm en el sistema en sustrato, donde no se encontró diferencia significativa entre tratamientos (Cuadro 3), siendo este un parámetro considerado como normal para tomate (Juárez *et al.* 2015).

En la figura 7, se puede observar el comportamiento de esta variable durante el ciclo del cultivo. En este experimento, en ambos tratamientos la etapa de floración y

fructificación comenzó en el mes de mayo, donde se puede observar que el tamaño de las hojas decreció, ya que hubo una mayor demanda de fotoasimilados para la formación de los frutos. Ortega *et al.*, (2010) mencionan que cuando los primeros tres racimos en fructificación están creciendo rápidamente, hay gran demanda de asimilados y estos son suministrados por las hojas medias.

Como se puede observar en la gráfica, las hojas del cultivo en carrete fueron siempre inferiores a partir del mes de junio, posiblemente porque a partir de ese mes, los tallos se comenzaron a enrollar y cada que se hacía esta actividad las plantas presentaban un ligero estrés hídrico en las hojas, perdiendo turgencia.



**Figura 7.** Longitud de hoja en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en sustrato en bolsa.

Para ambos tratamientos, el manejo fue muy similar en el presente experimento. Mata *et al* (2010), dice que el desarrollo agronómico de las plantas está regulado por múltiples factores bióticos y abióticos y la interacción entre ellos, así como los estimulo que estos factores pueden generar en su desarrollo, así que el sistema de producción es únicamente una parte en la interacción y puede o no influenciar el desarrollo de forma significativa.

#### 4.2.- Variables de rendimiento de la producción de tomate

En el Cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos en las variables relacionadas con el rendimiento, donde únicamente el diámetro polar del fruto no tuvo diferencias significativas entre los tratamientos, mientras que, en fruto por planta, peso por fruto, diámetro ecuatorial y rendimiento si hubo diferencias estadísticas significativas (Welch t test  $\alpha \leq 0.05$ ), presentando los mejores resultados el cultivo en carrete. La razón de obtener los mejores resultados en este tratamiento se debe posiblemente al efecto constante de la solución nutritiva, según Ortega *et al* (2010) el número de frutos involucra procesos fisiológicos como la relación fuente demanda, al igual el tamaño potencial del fruto está definido por el número de células del ovario fijado en pre-antesis, mientras que su tamaño real es consecuencia de la elongación celular durante el período de crecimiento rápido.

Los resultados obtenidos en este estudio para estas variables son muy superiores a los mencionados por De la Rosa *et al* (2016), que evaluó la misma variedad; y muestra que el mejor tratamiento fue un sistema hidropónico abierto donde obtuvo un promedio por fruto de 94.18 g.

**Tabla 4.** Indicadores del rendimiento en tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa.

Tratamiento <sup>2</sup>	Variables de rendimiento <sup>1</sup>					Categoría comercial predominante
	Frutos por planta	Diámetro (mm)		Peso por fruto (g)	Rendimiento (kg planta <sup>-1</sup> )	
		Polar	Ecuatorial			
Carrete	65.92 a	63.85 a	55.91 a	109.58 a	7.20 a	2 (100 - 130 g)
Sustrato	59.54 b	63.19 a	54.56 b	103.91 b	6.19 b	3 (80 - 100 g)
p-value	0.0246	0.333	0.0016	1.75E <sup>-05</sup>	0.0032	
Significación <sup>3</sup>	*	Ns	**	**	**	

<sup>1</sup> Cada dato representa la media de la producción total por planta.

<sup>2</sup> Dentro de cada columna, letras diferentes a continuación de las medias indican diferencias significativas  $\alpha \leq 0.05$ , según la prueba t de Welch.

<sup>3</sup> NS, \*, \*\*: No significativo o significativo a prueba  $p \leq 0.05$  o  $p \leq 0.01$ , respectivamente, obtenida por la prueba t de Welch.

#### 4.2.2.- Número de frutos por planta

El número de frutos por planta fue mayor en el sistema en carrete con 65 frutos en comparación con los 59 frutos de las plantas testigo en sistema en sustrato, esto representó un incremento del 10% en número de frutos por planta y estos datos son similares a los presentados por Lycoskoufis y Mavrogianopoulos (2020) y superiores a los reportados por De la Rosa (2016), donde obtuvo 46 frutos por planta, con la misma variedad.

#### 4.2.3.- Tamaño del fruto

Para esta variable sólo el diámetro ecuatorial de fruto fue diferente significativamente entre ambos tratamientos evaluados (Cuadro 4), el sistema de cultivo en carrete presentó el valor más alto de 55.91 mm comparado con el sistema el sustrato que fue de 54.56 mm, y no se encontró diferencia significativa para las variables diámetro polar del fruto en ambos tratamientos. Los resultados de ambos sistemas hidropónicos son similares a los De la Rosa *et al* (2016) donde se utilizó el mismo cultivar en un sistema hidropónico abierto y cerrado.

El tamaño del fruto está fuertemente relacionado con el número de frutos, ya que, a un menor número de frutos, mayor es la cantidad de foto asimilados destinados a cada fruto, propiciando mayor tamaño de fruto (Ucan *et al.*, 2005; Pérez *et al.*, 2012). Al igual De la Rosa *et al* (2018) encontraron que el tamaño del fruto también está relacionado con el peso del fruto. Asimismo, Ortega *et al* (2010) mencionó que la competencia se establece entre los frutos de un mismo racimo, y tiende a disminuir el tamaño del fruto por inflorescencia, siendo pequeños los del extremo y más en los últimos racimos de la planta.

#### 4.2.4.- Peso del fruto

El peso del fruto por planta también fue diferentemente significativo entre ambos tratamientos, donde el sistema de cultivo en carrete presentó un peso promedio por fruto de 109.6 g, superior al 5% respecto al sistema en bolsa que fue de 103.9 g (Cuadro 4), lo cual puede deberse principalmente a que el sistema en carrete permite contar con un suministro constante de SN en equilibrio facilitando la

absorción de nutrientes a diferencia del sustrato en bolsa que a medida que avanza el ciclo del cultivo se incrementa la conductividad eléctrica (CE) y limita la absorción (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014).

#### 4.2.5.- Rendimiento

El rendimiento se expresó en kilogramos de fruto producidos por planta, donde se encontró diferencia estadística significativa entre tratamientos, destacando como era de esperarse el tratamiento de cultivo en carrete con 7.20 kg planta<sup>-1</sup> y 43.2 kg m<sup>-2</sup>, con un 16.3% más de producción en comparación con el sistema en sustrato que fue de 6.19 kg planta<sup>-1</sup> y 37.14 kg m<sup>-2</sup> (Cuadro 4). Aun así, estos resultados son mayores a los de Zarate (2007) con 5.83 kg planta<sup>-1</sup> y 35 kg m<sup>-2</sup>, pero es más altos el reportado por Ortiz (2004) con 8.2 kg planta<sup>-1</sup> y 17.2 kg m<sup>-2</sup>, es importante destacar que los datos con los que se compara el rendimiento de este experimento se dieron bajo condiciones ambientales distintas y los resultados para la variable kg/m<sup>2</sup> son equivalentes a 6 plantas m<sup>-2</sup>; un estudio realizado por Villegas *et al* (2004) recomienda esta densidad de plantación, obteniendo el mayor rendimiento de exportación comercial.

De acuerdo a la variable peso de fruto por planta se permitió la clasificación en categorías, predominando en el sistema en carrete la categoría comercial 2 (100-130 g) correspondiendo a 41.7 % del total de frutos por planta y en el sistema en bolsa predominando la categoría 3 (80-100 g) con el 40.1 % del total de frutos por planta, de acuerdo con la escala establecida para pesos de frutos.

Tomando en cuenta que el manejo de la nutrición en ambos sistemas de producción fue el adecuado para alcanzar el potencial del cultivo, estos datos sugieren que el mayor rendimiento en el sistema en carrete se debió a que las plantas tenían agua y nutrientes disponibles en todo momento de forma constante. Estudios realizados por Rodríguez-Ortega *et al* (2019), donde probaron diferentes sistemas de producción hidropónicos, indican que en el sistema NFT las raíces siempre están sumergidos en SN y, por lo tanto, el agua y los nutrientes están fácilmente disponibles; y en el sustrato, aunque es un sistema sin suelo, las raíces solo están en contacto con SN cuando se aplica el riego; en sustratos inertes como lo es el

caso específico de la perlita, siendo un sustrato sólido en el que tanto el contenido de agua como la concentración de sal pueden variar ampliamente entre cada evento de riego (Voća *et al.*, 2007; Borowski y Nurzynski, 2012).

Así mismo, el medio de crecimiento en el que crecieron las raíces en el sistema en carrete, fueron en gran medida muy diferente entre sistemas de producción, por lo que, las propiedades morfológicas y fisiológicas de las raíces también pueden diferir y determinar la respuesta de rendimiento (Rodríguez-Ortega *et al.* 2019).

#### **4.3.- Respuesta fotosintética y otras variables fisiológicas**

La fotosíntesis y otras variables fisiológicas se determinaron en 10 plantas de cada tratamiento a los 231 días después del trasplante (Figura 9). Todas las variables presentan diferencias estadísticas significativas (Welch t test  $\leq 0.05$ ) entre ambos sistemas de producción. La fotosíntesis determinada en el sistema de carretes fue  $17.59 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  siendo un 36.4% más a diferencia de las plantas testigo en el sistema en sustrato que fue de  $12.89 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $p= 0.00023$ ); en cuanto a la tasa de transpiración foliar, el sistema en carrete fue  $7.74 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$  siendo 104.7% mayor que en sustrato la cual fue  $3.78 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $p=0.0000045$ ), con respecto a la conductancia estomática, esta fue de  $0.40 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  siendo 110.5% mayor que en el sistema en sustrato con  $0.19 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  ( $p=0.0001$ ). Referente a la temperatura de la hoja los datos fueron para el carrete  $22.07 \text{ }^\circ\text{C}$  siendo 3.4% mayor que el sistema en sustrato con  $21.24 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $p=0.0138$ ).

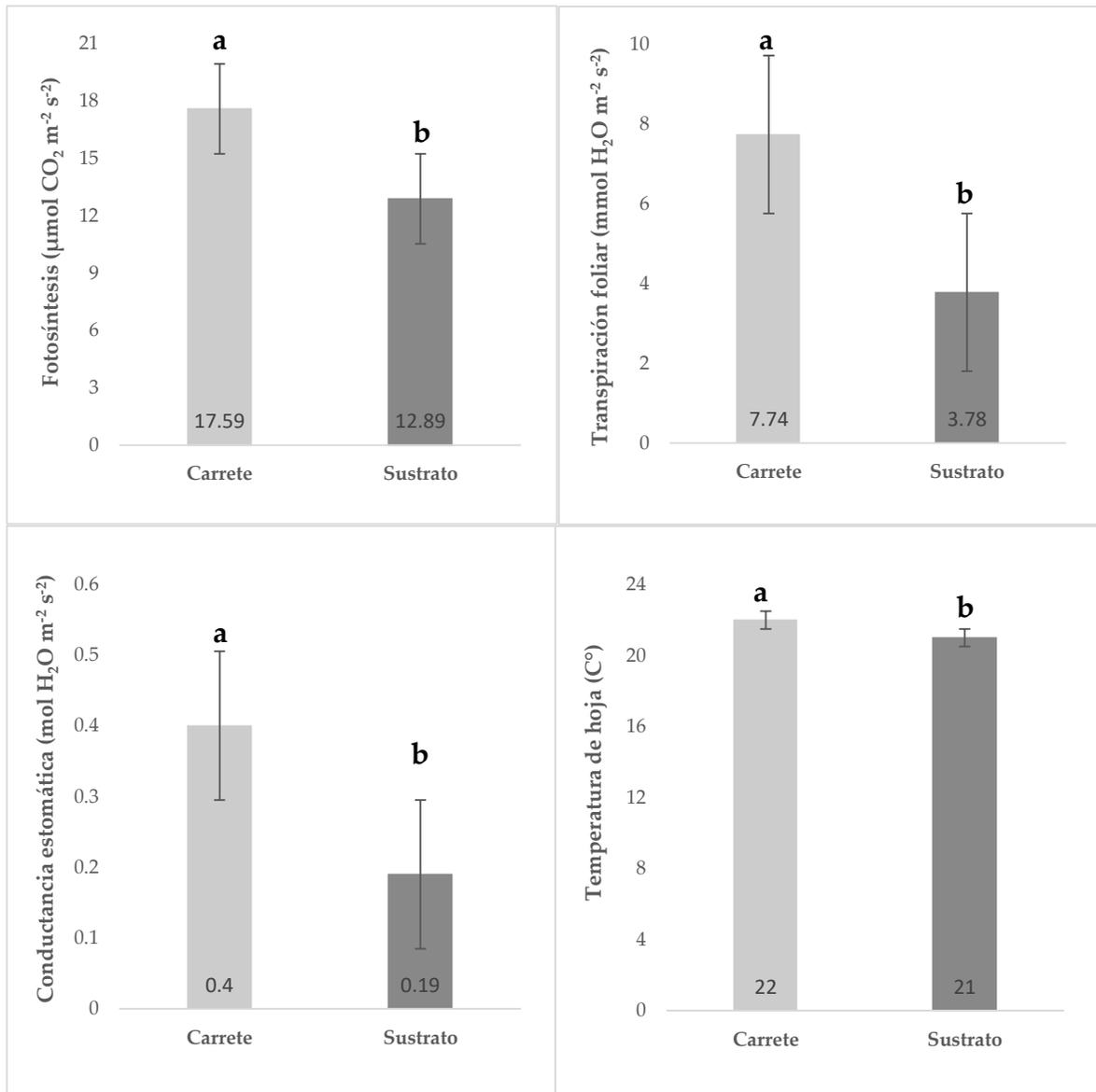
Los datos indican que el sistema en carrete reportó un mayor intercambio gaseoso y proceso fotosintético que el sistema en sustrato, lo cual puede estar relacionado a la disponibilidad de agua y nutrientes constantes en el sistema, no presentando estrés hídrico. Un estudio realizado por Hayat *et al* (2008), observaron un decremento en la tasa fotosintética en cultivo de tomate sometido a estrés hídrico, Zegbe *et al* (2007) indica que existe una fuerte relación entre la disponibilidad de agua y la fotosíntesis.

En el sistema en sustrato, las plantas probablemente tuvieron algún tipo de estrés hídrico entre los riegos a pesar de las aplicaciones a demanda según las

necesidades de las plantas, esto se corrobora con los datos obtenidos en transpiración al ser menores comparados con el carrete, lo que indica que las plantas en sustrato reducen la pérdida de agua por transpiración a través del cierre de sus estomas. Lo anterior se refleja en los resultados de conductancia estomática ( $0.19 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) y por ende en la limitación del intercambio gaseoso y la disminución de la fotosíntesis, comparado con los resultados del sistema en carrete donde la fotosíntesis fue mayor en  $4.71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  lo que representa un 36.4% más que lo reportado por las plantas testigo en el sistema en sustrato.

La fotosíntesis es muy importante, ya que explica la mayor parte de la variación del rendimiento, lo cual es la base para la rentabilidad económica del cultivo (Pirasteh *et al.*, 2016; Takai *et al.*, 2010). La producción de raíces adventicias del tallo enrollado en el sistema en carrete favorece la utilización de fotoasimilados generados en el proceso respiratorio. Balibrea *et al* (2000) y Giménez (2015) mencionan que la ganancia neta de biomasa, no solo depende de la fotosíntesis (ganancia de carbono), sino también del uso de fotoasimilados en procesos respiratorios (pérdidas de carbono) y gran parte de esta respiración se da en las raíces, respirando entre un 20 y 40 % del total de los fotoasimilados producidos por la planta durante el día, para generar la energía necesaria de mantenimiento y aumentar la biomasa existente.

En este experimento la raíz principal del sistema en carrete se eliminó y la planta únicamente utilizó las raíces adventicias para realizar sus procesos de absorción de agua y nutrientes, así como equilibrando y aumentando la relación entre respiración de mantenimiento (gastos de energía que no determinan una ganancia de biomasa) y respiración de crecimiento (costos de carbono para energía metabólica utilizada durante la biosíntesis y el crecimiento), ya que agua y nutrientes se encuentran a disposición de las raíces, siendo el gasto del sistema radical mucho menor y no limitan el crecimiento; permitiendo a la planta adaptarse a condiciones medioambientales adversas (Nebauer *et al.*, 2013).



**Figura 8.** Tasa fotosintética, temperatura de las hojas, transpiración foliar y conductancia total de los estomas, en 10 plantas de tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa con sustrato.

#### 4.3.2 Eficiencia intrínseca

La variable uso eficiente del agua (UEA) o eficiencia intrínseca a escala foliar y a nivel de eficiencia de la transpiración, en el sistema en carrete fue de 2.27 y 3.42 ( $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ) en el sistema en bolsa, esto se debió a que el decremento en la tasa de transpiración de las plantas que crecieron en bolsa, fue mayor que la reducción en la tasa de asimilación de bióxido de carbono de las mismas plantas,

indicando que el sistema en bolsa tiene mayor intercambio de CO<sub>2</sub> por molécula de agua transpirada. En el sistema en carrete se tiene un menor valor de UEA, esto probablemente a la mejora en la disponibilidad de agua en las hojas que resultó en una mayor tasa de transpiración (López *et al.*, 2015; Escalona *et al.*, 2015).

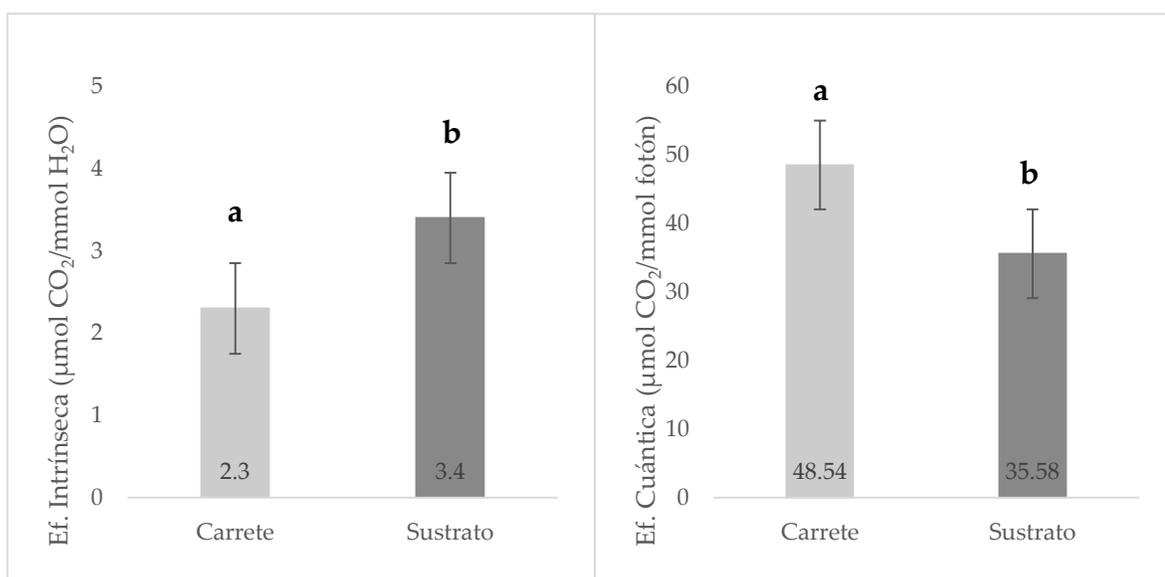
Las plantas que crecieron en carrete tuvieron mayor asimilación de CO<sub>2</sub> (27%), pero también mayor tasa de transpiración (104.7%), y la relación entre estas (eficiencia intrínseca) fue menor que la observada en las plantas que crecieron en bolsas. Sun *et al.* (2013) indican que la eficiencia intrínseca se reduce con la apertura estomática, lo cual depende de la respuesta de los estomas a los cambios ambientales o factores de estrés, en este estudio la conductancia estomática es mayor en el sistema en carrete, así como la temperatura de las hojas (Figura 10), lo que explica una mayor transpiración y por ende una menor eficiencia intrínseca.

Melendres *et al.* (2017) mencionan que la eficiencia intrínseca es usada como un indicador de la habilidad de las plantas para adaptarse al déficit hídrico, por lo que, a mayor estrés hídrico, mayor eficiencia intrínseca. En contraste, la cantidad de agua usada en el sistema en carrete fue menor ya que se mantuvo en continua recirculación y el sistema en sustrato en bolsa fue a solución perdida; reportándose valores de agua en litros por kilogramo producido de fruto, para el sistema en carrete 35.13 L · kg<sup>-1</sup> y 61.30 L · kg<sup>-1</sup> para el sistema en bolsa.

#### 4.3.3 Eficiencia cuántica

Para el caso de la eficiencia fotosintética (Fv/Fm) o eficiencia cuántica se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (prueba t de Welch,  $\alpha \leq 0.05$ ) de 12.96  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol fotón}$ , siendo el sistema en carrete el más alto comparado con el sistema en bolsa con 48.54 y 35.58  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol fotón}$  respectivamente lo que indica una diferencia de 12.96  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol fotón}$ , lo que representa un 36.4% más (Figura 10). DeEll y Toivonen (2003) mencionan que la Fv/Fm refleja la eficiencia cuántica potencial del PSII y se utiliza como indicador sensible de la eficiencia fotosintética de las plantas.

Por su parte Pérez-Asseff *et al* (2007) indican que su disminución en función de la irradiación, puede considerarse un indicador de alteración en el aparato fotosintético, a nivel de su conversión cuántica y transporte de electrones, resultando una reducción de la actividad fotosintética en la planta. Lo antes mencionado nos permite indicar que las plantas en el sistema en carrete tienen un mejor desempeño de los fotosistemas, ya que la eficiencia cuántica es regulada por mecanismos de control fisiológico que optimizan su funcionamiento. (Medrano *et al.*, 2007), indicando que en el sistema en sustrato las plantas tuvieron cierta condición de estrés.



**Figura 9.** Eficiencia intrínseca y cuántica en 10 plantas de tomate cv. EL CID, en el sistema NFT tipo carrete y el testigo en bolsa con sustrato.

## V.- CONCLUSION

Bajo las condiciones y sistemas estudiados en invernadero, el crecimiento de las plantas de tomate se comporta de la misma manera, tanto en la longitud y diámetro de tallo, como en la longitud de hojas.

El rendimiento fue mayor en el sistema en carrete que en el sistema en sustrato, por ende, el número y peso de frutos, así como el diámetro ecuatorial también fue mayor. En contraste, el diámetro polar del fruto fue igual en ambos sistemas de producción.

Las variables fisiológicas tales como la tasa fotosintética, transpiración, conductancia estomática y temperatura de la hoja, fueron mayores en el sistema en carrete. La eficiencia intrínseca fue mayor en el sistema en sustrato, debido a que las plantas transpiran en menor cantidad para fijar el CO<sub>2</sub>, en comparación con el sistema en carrete donde las plantas transpiraban más para fijar el CO<sub>2</sub>. Esto debido a que las raíces de las plantas en el sistema en carrete están siempre en SN, no presentando estrés hídrico. Por su parte la eficiencia fotosintética fue superior en el sistema en carrete, lo que indica un mejor desempeño de los fotosistemas, a diferencia del sistema en sustrato.

Al obtener plantas cortas durante todo el ciclo del cultivo, el agua y nutrientes se aprovecha de mejor manera, así que el sistema NFT modificado en carrete es una alternativa viable para la producción comercial de tomate bajo invernadero.

## VI.- LITERATURA CITADA

- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., & Rodriguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, 2(4), 45-54.
- Alemán, R. D., Domínguez, J., Rodríguez, Y., & Soria, S. (2016). Indicadores morfológicos y productivos del cultivo del tomate en invernadero con manejo agroecológico en las condiciones de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 43(1), 71-76.
- AMHPAC. (2020). *Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A.C.* Obtenido de Portal de negocios y mercados. Histórico Cierres de la Producción Agrícola - SIAP SADER.: <https://amhpac.org/negociosymercados/socios/v2/produccion/>
- Ardila, G., Fischer, G., & Balanguera, H. E. (2011). 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.
- Arellano, M. A., Valera, D. L., Urrestarazu, M. Q., Murguía, J., & Zermeño, A. (2011). Ventilación natural y forzada de invernaderos tipo Almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 379-386.
- Arriaga, A., De la Cruz, G., & Mandujano, M. (2016). Conductividad hidráulica en tallos florales de rosa cv. Polo con diferente longitud. *Revista fitotecnia mexicana*, 39(3), 233-239.

- Azorín, A. (2017). *Variación morfológica en la arquitectura radicular en una colección de líneas de introgresión de tomate (S. pennellii S. lycopersicum)*. Tesis de licenciatura, Instituto de Biotecnología , Biología aplicada.
- Balibrea, M. E., Dell'Amico, J., Bolarín, M. C., & Pérez, F. (2000). Carbon partitioning and sucrose metabolism in tomato plants growing under salinity. *Physiologia Plantarum*, 110(4), 503-511.
- Barbado, J. L. (2005). *Hidroponía. Su empresa en cultivos en agua* (Primera ed.). Buenos Aires: Editorial Albatros.
- Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. 22(1), 81-90.
- Bellini, C., Pacurar, D. I., & Perrone, I. (2014). Adventitious roots and lateral roots: similarities and differences. *Annual review of plant biology*, 65, 639-666.
- Beltrano, J. (2015). Introducción al cultivo hidropónico. En B. José, & D. O. Gimenez, *Cultivo en hidroponía* (págs. 10-33). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Benková, E., & Bielach, A. (2010). Lateral root organogenesis—from cell to organ. *Current opinion in plant biology*, 13(6), 677-683.
- Blanca, J., Cañizares, J., Cordero, L., Pascual, L., Diez, M. J., & Nuez, F. (2012). Variation revealed by SNP genotyping and morphology provides insight into the origin of the tomato. *Plos one*, 7(10), e48198.
- Borowski, E., & Nurzynski, J. (2012). Effect of different growing substrates on the plant water relations and marketable fruit yield greenhouse-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta agrobotanica*, 65(3), 49-56.
- Botella, O., & Campos, I. (2005). Las relaciones agua-planta. En F. M. Olalla, P. López, & A. Calera, *Agua y Agronomía* (págs. 87-162). México: Editorial MundiPrensa.

- Bravo, M. Y., & Torres, D. I. (2013). *Efecto de la maceta y bolsa con fibra de coco en la producción de tomate (Lycopersicum esculentum) variedad 7513 en hidroponía bajo invernadero*. Escuela Agrícola Panamericana, Ingeniería Agronómica, Zamorano Honduras .
- Casimiro, I., Beeckman, T., Graham, N., Bhalerao, R., Zhang, H., Casero, P., . . . Bennett, M. J. (2003). Dissecting Arabidopsis lateral root development. *Trends in plant science*, 8(4), 165-171.
- Castañares, J. L. (2020). *ABC de la hidroponía*. Argentina: INTA.
- CCB, C. d., & VFE, V. d. (2015). *Manual tomate*. Bogotá: Programa de apoyo agrícola y agroindustrial.
- CEDRSSA. (2020). *Centro de estudios para el desarrollo rural sustentable y la soberanía alimentaria*. Obtenido de Análisis de la producción y consumo de hortalizas:  
[http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/88Ana%CC%81lisis\\_produccio%CC%81n\\_consumo\\_hortalizas.pdf](http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/88Ana%CC%81lisis_produccio%CC%81n_consumo_hortalizas.pdf)
- Contreras, E. A. (2014). *Efecto del injerto sobre la nutrición y fotosíntesis de tomate (lycopersicon esculentum mill) bajo condiciones de invernadero*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía.
- De la Rosa, R., Lara, A., Lozano, J., Padilla, L. E., Avelar, J. J., & Castañeda, R. (2016). Rendimiento y calidad de tomate en sistemas hidropónicos abierto y cerrado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*(17), 3439-3452.
- De la Rosa, R., Lara, A., Padilla, L. E., Avelar, J. J., & España, M. P. (2018). Proporción de drenaje de la solución nutritiva en el rendimiento y calidad de tomate en hidroponía. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(20), 4343-4353.
- De Smet, I. (2012). Lateral root initiation: one step at a time. *New Phytologist*, 193(4), 867-873.

- Deaquiz, Y. A. (2014). Los frutos y su fotosíntesis. *Conexión Agropecuaria JDC*, 4(1), 39-47.
- DeEll, J. R., & Toivonen, P. M. (2003). Use of chlorophyll fluorescence in postharvest quality assessments of fruits and vegetables. In Practical applications of Chlorophyll fluorescence in plant biology. En J. R. DeEll, & P. M. Toivonen, *Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology* (págs. 203-242). Boston, MA: Springer.
- Díaz, H. A. (1996). Toma, transporte y metabolismo del agua y nutrientes en la planta. *Agronomía Colombiana*, 13(2), 138-141.
- Escalona, J. M., Flexas, J., Bota, J., & Medrano, H. (2015). Distribution of leaf photosynthesis and transpiration within grapevine canopies. *Vitis Journal of Grapevine Research*, 42(2), 57–64.
- Escobar, H. (2009). *Manual de producción de tomate bajo invernadero*. (H. Escobar, & R. Lee, Edits.) Republica de Colombia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- FAO. (2020). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de FAOSTAT: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Faustino, L. I., Graciano, C., Gortari, F., & Guiamet, J. J. (2011). ¿Cómo afectan los nutrientes el uso del agua en plantas leñosas? *Ecología austral*, 21(3), 233-250.
- Fernández, V., Cámara, M., & Quintela, J. C. (2007). Ingredientes bioactivos de tomate: el licopeno. *Nutrición clínica y dietética hospitalaria*, 27(3), 36-40.
- Flores, L. A., Lobato, R., García, J. J., Molina, J. D., Sargerman, D. M., & Velasco, M. d. (2017). Parientes silvestres del tomate como fuente de germoplasma para el mejoramiento genético de la especie. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(1), 83-91.

- Flores-Rondon, G. L. (2020). *Producción de acelga (Beta vulgaris L. var. Fordhook Giant) con uso de dos fuentes de agua salina en hidroponía-sistema raíz flotante bajo condiciones de invernadero en Arequipa*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de agronomía , Perú.
- Fornaris, G. J. (2007). Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate: Características de la planta. En *Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate de Ensalada* (págs. 1-6). Puerto Rico: Estación Experimental Agrícola.
- Gallo, M., Rodríguez, G. R., Zorzoli, R., & Pratta, G. R. (2011). Ligamiento genético entre variables asociadas a calidad del fruto de tomate y polipéptidos expresados en dos estados de madurez. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2), 145-156.
- Gavidia, L. (2017). *Efecto de la solución nutritiva la Molina en el rendimiento de dos variedades de lechuga (Lactuca sativa L.) con el sistema NFT (Nutrient Film Technique) en condiciones de hidroponía de nuevas flores Culquish-Huamalíes 2016*. Tesis de licenciatura , Universidad Nacional Hermilio Valdizán Huánuco, Ciencias Agrarias , Huanúco-Perú.
- Gil, E., Aranda, I., Peguero, J. J., & Vilagrosa, A. (2005). El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 14(3), 358-370.
- Giménez, D. O. (2015). Economía del carbono. En J. Beltrano, & D. O. Gimenez, *Cultivo en hidroponía* (págs. 45-61). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Gruda, N. S. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(3), 141 - 147.
- Guanoluisa, R. H. (2014). *Evaluación fenológica y rendimiento de dos sistemas de producción bajo invernadero, en suelo acolchado e hidropónico, para 2*

- cultivares de tomate (Lycopersicum esculentum, Mill)*. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de ingeniería química y agroindustrial. Quito.
- Hayat, S., Hasan, S. A., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). Growth of tomato (*Lycopersicon esculentum*) in response to salicylic acid under water stress. *Journal of Plant Interactions*, 3(4), 297-304.
- Hesse, M., Halbritter, H., Zetter, R., Webber, M., Buchner, R., Frosch-Radivo, A., & Ulrich, S. (2009). Pollen morphology. En *Pollen terminology: An illustrated handbook* (págs. 15-25). Springer.
- Heuvelink, E., & Okello, R. (2018). Developmental processes. En E. Heuvelink, *Tomatoes* (segunda ed., Vol. 27, págs. 59-88). Wallingford, UK: CABI.
- Iglesias, N. (2006). *Producción de hortalizas bajo cubierta: Estructura y manejo de cultivo para la Patagonia Norte* (tercera ed.). (C. Bellés, Ed.) Centro Regional Patagonia Norte: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria).
- Jarquín, L. (2013). *Estudio del efecto de la calidad de luz sobre la síntesis y la acumulación de licopeno en frutos de tomate cultivados en invernadero*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de química, Querétaro.
- Jones, J. B. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower* (second ed.). Estados Unidos: CRC Press.
- Juárez, M. A., De Alba, R. K., Ramírez, H., & Benavides, M. A. (2015). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(5), 943-954.
- Juárez, P., Bugarín, R., Castro, R., Sánchez, A. L., Cruz, E., Juárez, C. R., . . . Balois, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente*, 3(8).
- Krauss, S., Schnitzler, W. H., Grassmann, J., & Woitke, M. (2006). The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless

- system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(2), 441-448.
- Laplaze, L., Benkova, E., Casimiro, I., Maes, L., Vanneste, S., Swarup, R., . . . Beeck, T. (2007). Cytokinins act directly on lateral root founder cells to inhibit root initiation. *The Plant Cell*, 19(12), 3889-3900.
- Ligarreto, G. A. (2013). Componentes de variancia en variables de crecimiento y fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 87-96.
- López, P. P., Cano, A., Rodríguez, G. S., Torres, N., Rodríguez, S. M., & Rodríguez, R. (2011). Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. *Tecnociencia*, 5(2), 98-104.
- López, R., Inzunza, M. A., Sánchez, I., Fierro, A., & Sifuentes, E. (2015). Water use efficiency and productivity of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) based on two transplanting dates. *Water Science and Technology*, 71(6), 885-891.
- López-Marín, L. M. (2017). *Manual técnico del cultivo del tomate: Solanum lycopersicum*.
- Luna, M. L., & Delgado, A. (2014). Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Avances en Investigación Agropecuaria*, 18(1), 51-66.
- Lycoskoufis, I., & Mavrogianopoulos, G. (2020). NDT, a new soilless growing system without substrate suitable for Mediterranean conditions. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 48(3), 1292-1305.
- Magán, J. J., Gallardo, M., Thompson, R. B., & Lorenzo, P. (2008). Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural water management*, 95(9), 1041-1055.

- Mata, E. (2021). *Utilización de una colección de germoplasma de tomate para la identificación de genes de interés*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- Mata, H., Anguiano, R. A., Vázquez, E., Gázano, I., González, D., R. M., & Cervantes, J. E. (2010). Producción de tomate sistema hidropónico con solución nutritiva reciclable en sustrato de Tezontle. *Ciencia UAT*, 4(4), 50-54.
- Mazuela, P., Acuña, L., Álvarez, M., & Fuentes, Á. (2010). Producción y calidad de un tomate cherry en dos tipos de invernadero en cultivo sin suelo. *IDESIA*, 28(2), 97-100.
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas (Esp)*(43), 63-84.
- Melendres, A. I., Zermeño, A., Ramírez, H., Cárdenas, J. O., & Cadena, M. (2017). Eficiencia del uso del agua de un viñedo y su relación con porosidad del suelo. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(5), 57-69.
- Monardes, H. (2009). 2. Características Botánicas. En V. Escalona, P. Alvarado, H. Monardes, C. Urbina, & A. Martin, *Manual de cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.)* (págs. 10-12). Facultad de CS. Agronomicas, Universidad de Chile.
- Moreno, A., Aguilar, J., & Luévano, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29, 763-774.
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana*, 27(2), 179-191.
- Muñoz, R. J., & Castellano, J. Z. (2009). Manejo del cultivo de tomate en invernadero. En R. J. Castellanos, *Manual de producción de tomate en*

- invernadero* (págs. 45-92). Celaya, Guanajuato, México.: Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura (INTAGRI).
- Naija, S., Elloumi, N., Jbir, N., Ammar, S., & Kevers, C. (2008). Anatomical and biochemical changes during adventitious rooting of apple rootstocks MM 106 cultured in vitro. *Comptes rendus biologiques*, 331(7), 518-525.
- Nakazato, T., Warren, D. L., & Moyle, L. C. (2010). Ecological and geographic modes of species divergence in wild tomatoes. *American Journal of Botany*, 97(4), 680–693.
- Nebauer, S. G., Sánchez, M., Martínez, L., Lluch, Y., Renau, B., & Molina, R. V. (2013). Diferencias en el rendimiento fotosintético y su correlación con el crecimiento entre cultivares de tomate en respuesta a diferentes sales. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 61-69.
- Nibau, C., Gibbs, D. J., & Coates, J. C. (2008). Branching out in new directions: the control of root architecture by lateral root formation. *New Phytologist*, 179(3), 595-614.
- Nicola, S., Pignata, G., Casale, M., Hazrati, S., & Ertani, A. (2021). Setting Up a Lab-Scale Pilot Plant to Study the New Growing System (NGS®) for Leafy Vegetable and Culinary Herb Growth. *Horticulturae*, 7(5), 90.
- Nuez, F. (2001). *El cultivo del tomate*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Nuez, F., Gil, R., & Costa, J. (2003). *El cultivo de pimientos, chiles y ajíes*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Olalla, F. M., Ortega, J. F., & López, R. (2005). Agua y agronomía. En F. M. Olalla, P. López, & A. Calera, *Agua y agronomía* (págs. 271-294). Mundi-Prensa.
- Olvera-Cruz, L. A. (2016). *Evaluación agronómica y fisiológica de fresa en un sistema hidropónico tipo revólver*. Tesis de maestría, Colegio de postgraduados, Posgrado en recursos genéticos y productividad fisiología vegetal, Estado de México.

- Olvera-Rodríguez, V. (2016). *Invernadero hidropónico automatizado en riego, con monitoreo de pH, conductividad eléctrica y control de variables climáticas*. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencia y Tecnología: Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales, Ciudad de México.
- Ortega, L. D., Sánchez, J., Ocampo, J., Sandoval, E., Salcido, B. A., & Manzo, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3), 339-346.
- Ortiz, G. (2004). *Comparación de la producción de jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.) en hidroponía y suelo bajo invernadero en Miahuatlan, Puebla Tesis profesional*. Universidad Autónoma de Chapingo,, Departamento de Fitotecnia, Texcoco.
- Pacheco, I. A., Chávez, J., & Carrillo, J. C. (2014). Relación entre variación ecológica-orográfica y variabilidad morfológica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 1(1), 28-39.
- Peil, R. M., & Gálvez, J. L. (2004). Rendimiento de plantas de tomate injertadas y efecto de la densidad de tallos en el sistema hidropónico. *Horticultura Brasileira*, 22(2), 265-270.
- Peralta, I. E., Spooner, D. M., & Knap, S. (2008). Taxonomy of wild tomatoes and their relatives (*Solanum* sect. *Lycopersicoides*, sect. *Juglandifolia*, sect. *Lycopersicon*; Solanaceae). *Systematic botany monographs*, 84, 1-186.
- Pérez, M. B., Albarracín, M., Moratinos, H., & Zapata, F. (2012). Rendimiento y calidad de fruto en cuatro cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones protegidas. *Rev. Fac. Agron*, 29(3), 395-412.
- Pérez-Asseff, J. M., Peña, E. J., & Torres, C. (2007). Efecto del nitrógeno y la irradiación en la eficiencia fotosintética del Anamú *Petiveria alliacea*

- (Phytolaccaceae). *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 31(118), 49-56.
- Pérez-Urria, E. (2009). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 1-47.
- Pineda, J., Sánchez, F., Ramírez, A., Castillo, A. M., Valdés, L. A., & Moreno, E. d. (2012). Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 18(1), 95-111.
- Pirasteh, H., Saed, A., Pakniyat, H., & Pessarakli, M. (2016). Stomatal responses to drought stress. En A. Parvaiz, *Water stress and crop plants: A sustainable approach* (Vol. II, págs. 24-40). India: Wiley Blackwell.
- Ploeg, V. D., & Heuvelink, E. (2005). Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(6), 652-659.
- Pop, T. I., Pamfil, D., & Bellini, C. (2011). Auxin control in the formation of adventitious roots. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanica Cluj-Napoca*, 39(1), 307-316.
- Power, A., & Bennett, A. (2002). Tomato. En V. Valpuesta, *Fruit and vegetable Biotechnology* (págs. 185-221).
- Puerta, A. R., Shinohara, Y., & Maruo, T. (2007). A modified nutrient film technique system offers a more uniform nutrient supply to plants. *HortTechnology*, 17(2), 227-233.
- Ragel, P. (2012). *Identificación y caracterización de los elementos implicados en el inicio de la síntesis de almidón en plantas*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Bioquímica Vegetal y Biología Molecular.
- Ramirez, E., & Martínez, S. T. (2016). Determinación del contenido extra e intracelular de algunas enzimas líticas relacionadas con la pared celular en

- raíces de clavel (*Dianthus caryophyllus* L.). *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 5-11.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* (Seventh ed.). United States of America: CRC Press.
- Ricardo, J. J. (2019). *Evaluación del cultivo de lechuga hidropónica *Lactuca sativa* L. en raíz flotante bajo diferentes soluciones nutritivas*. Tesis de licenciatura, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias Agrarias, La Libertad.
- Rodríguez, L. (2000). Densidad de población vegetal y producción de materia seca. *Comalfi*, 27(1-2), 31-38.
- Rodríguez-Manzano, M. T. (2019). *Evaluación de líneas de mejora de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) de la pera en distintas condiciones de cultivo*. Tesis de maestría, Universidad Miguel Hernández del Elche, Ingeniería agronomica.
- Rodríguez-Ortega, W. M., Martínez, V., Nieves, M., Simón, I., Lidón, V., Fernandez, J. C., . . . García, F. (2019). Agricultural and physiological responses of tomato plants grown in different soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13.
- Romero, R. (1996). Relaciones agua planta en el sistema suelo-planta-atmósfera. En *Manejo y fertilidad de suelos*. (págs. 115 - 124). INIA La Estanzuela: Serie Técnica No. 76.
- Ron, M., Dorrity, M. W., De Lucas, M., Toal, T., Hernandez, R. I., Little, S. A., . . . Brady, S. M. (2013). Identification of novel loci regulating interspecific variation in root morphology and cellular development in tomato. *Plant Physiology*, 162(2), 755-768.

- Saavedra, T. M., Figueroa, G. A., & Cauih, J. G. (2017). Origin and evolution of tomato production *Lycopersicon esculentum* in México. *Ciência Rural*, 47(3), 1-8.
- San Martín, C., Ordaz, V. M., Sánchez, P., Beryl Colinas, M. T., & Borges, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) producido en hidroponia con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia*, 46(3), 243-254.
- Sánchez-Del Castillo, F., Bastida, O. A., Moreno, E. d., Contreras, E., & Sahagún, J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo*, 20(3), 239-251.
- Sánchez-Del Castillo, F., González, L., Moreno, E. d., Pineda, J., & Reyes, C. E. (2014). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista fitotecnia mexicana*, 37(3), 261-269.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno, E. d., Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez, J. E., & Osuna, E. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 2(48), 185-197.
- Santos, B. M., Obregón, H. A., & Salamé, T. P. (2010). Producción de hortalizas en ambientes protegidos: estructuras para la agricultura protegida. *HS1182*, 1-5.
- Sato, S., Peet, M. M., & Thomas, J. F. (2000). Physiological factors limit fruit set of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under chronic, mild heat stress. *Plant, Cell & Environment*, 23(7), 719-726.
- Sato, S., Peet, M. M., & Thomas, J. F. (2002). Determining critical pre-and post-anthesis periods and physiological processes in *Lycopersicon esculentum* Mill. exposed to moderately elevated temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 53(371), 1187-1195.

- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology that supports the application of integrated greenhouse crop management. *Food, Agriculture and Environment*, 1(1), 80-86.
- Sepúlveda, D., Loera, J., & Sepúlveda, D. E. (2015). Revisión de modelos matemáticos para captura de agua y nutrientes por la raíz de las plantas. En *Ciencias Químicas y Matemáticas* (págs. 47-59). ECORFAN.
- SIAP. (2020). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de Avance de siembra y cosecha : [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- SIAP. (2021). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de Escenario mensual de productos agroalimentarios. Tomate rojo (Jitomate).: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/621464/Escenario\\_Tomate\\_rojo\\_\\_Jitomate\\_\\_feb\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/621464/Escenario_Tomate_rojo__Jitomate__feb_2021.pdf)
- Solarte, M. E., Moreno, L., & Melgarejo, L. M. (2010). VI. Fotosíntesis y pigmentos vegetales. En L. M. Melgarejo, *Experimentos en fisiología vegetal* (págs. 107-122). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Song, N. (2012). Evolusi fotosintesis pada tumbuhan. *Jurnal Ilmiah Sains*, 12(1), 28-34.
- Sun, X. P., Yan, H. L., Kang, X., & W., M. F. (2013). Growth, gas exchange, and water-use efficiency response of two young apple cultivars to drought stress in two scion-one rootstock grafting system. *Photosynthetica*, 51(3), 404–410.
- Syngenta. (2010). *Producción de tomate bajo invernadero* (Segunda ed.). Boletín técnico.
- Takai, T., Kondo, M., Yano, M., & Yamamoto, T. (2010). A quantitative trait locus for chlorophyll content and its association with leaf photosynthesis in rice. *Rice*, 3(2), 172-180.
- Ucan, I., Sánchez, F., Contreras, E., & Corona, T. (2005). Efecto de la densidad de población y raleo de frutos sobre el rendimiento y tamaño del fruto en tomate. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(1), 33-38.

- Urrestarazu, M., Mazuela, P. C., Boukhalfa, A., Arán, A., & Salas, M. d. (2005). Oxygen content and its diurnal variation in a new recirculating water soilless culture for horticultural crops. *HortScience*, 40(6), 1729-1730.
- Vallejo, F. A., & Estrada, E. I. (2004). *Producción de hortalizas de clima cálido*. Univ. Nacional de Colombia.
- Varanda, A. C. (2018). *Influência do substrato na fitossanidade, na produção e na qualidade de morangos produzidos em sistema hidropónico fechado" New growing systems*. Tesis de maestría, Universidad de Évora, Fitotecnia, Évora.
- Verstraeten, I., Schotte, S., & Geelen, D. (2014). Hypocotyl adventitious root organogenesis differs from lateral root development. *Frontiers in Plant Science*, 5(495).
- Villacrés, H. I. (2019). *Evaluación de tres soluciones nutritivas en la producción de acelga (Beta vulgaris L.) Var Fordhook Giant, en hidroponía a raíz flotante en invernadero*. Tesis de licenciatura , Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Agronomica, Riobanba-Ecuador .
- Villegas, J. R., Gonzalez, V. A., Carrillo, J. A., Livera, M., Sanchez, F., & Osuna, T. (2004). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a densidades de población en dos sistemas de producción. *Revista fitotecnia mexicana*, 27(4), 333-338.
- Voća, S., Dobričević, N., Šindrak, Z., Borošić, J., & Benko, B. (2007). Quality of tomatoes grown on different substrates and harvested in three harvest periods. *Deutsche Lebensmittel Rundschau*, 103(9), 431-437.
- Werner, T., Motyka, V., Laucou, V. S., Van Onckelen, H., & Schmülling, T. (2003). Cytokinin-deficient transgenic Arabidopsis plants show multiple developmental alterations indicating opposite functions of cytokinins in the regulation of shoot and root meristem activity. *The Plant Cell*, 15(11), 2532-2550.

- Zambrano, A. C. (2014). *Estudio comparativo de tres genotipos de lechuga (Lactuca sativa L.) cultivadas en tres sistemas de producción hidropónica*. Tesis de licenciatura, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Agrarias, Ecuador .
- Zarate, B. (2007). *Producción de tomate (Lycopersicon esculentum Mill.) hidropónico con sustratos, bajo invernadero, tesis de maestría*. Tesis de maestría , Instituto Politécnico Nacional, C.I.D.I.R, Mexico.
- Zegbe, J. A., Hossein, B. M., & Clothier, B. E. (2007). Respuesta del tomate para proceso al riego parcial de la raíz. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 61-67.