



**Universidad Autónoma de Zacatecas**

**“Francisco García Salinas”**

**Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
Programa de Maestría en Ingeniería y Tecnología Aplicada**

**SISTEMAS HIDROPÓNICOS ABIERTO Y  
CERRADO EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE  
(*Lycopersicon esculentum*, Mill)**

TESIS

Para obtener el grado de  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

**RODOLFO DE LA ROSA RODRÍGUEZ**



Zacatecas, Zacatecas, Noviembre de 2016

La presente tesis titulada: **SISTEMAS HIDROPÓNICOS ABIERTO Y CERRADO EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum*, Mill)**, realizada por el alumno Rodolfo de la Rosa Rodríguez, bajo la dirección y asesoría del consejo particular que se indica, ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

Consejo particular:

---

Dr. Alfredo Lara Herrera  
Director de tesis

---

Dr. Fidel Blanco Macías  
Co-director de tesis

---

Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez  
Asesor

---

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez  
Asesor

---

Dra. Luz Evelia Padilla Bernal  
Asesora

**AGRADECIMIENTOS**

## AGRADECIMIENTOS

***Señor... Ayúdame a decir la verdad delante de los fuertes y a no decir mentiras para ganarme el aplauso de los débiles***

***Si me das fortuna, no me quites la razón. Si me das éxito, no me quites la humildad. Si me das humildad, no me quites la dignidad***

***Ayúdame siempre a ver la otra cara de la medalla, no me dejes inculpar de traición a los demás por no pensar igual que yo***

***No me dejes caer en el orgullo si triunfo, ni en la desesperación si fracaso. Más bien recuérdame que el fracaso es la experiencia que precede al triunfo***

***Enséñame que perdonar es un signo de grandeza y que la venganza es una señal de bajeza***

***Si yo ofendiera a la gente, dame valor para disculparme y si la gente me ofende, dame valor para perdonar***

***¡Señor... Si yo me olvido de ti, nunca te olvides de mí!***

**DEDICATORIA**

## CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE CUADROS EN APÉNDICE	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Hipótesis	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 El tomate	5
2.2 Generalidades del tomate	5
2.2.1 Origen y domesticación del tomate	5
2.2.2 Importancia del cultivo	5
2.2.3 Taxonomía y morfología	6
2.2.4 Sistema radical	6
2.2.5 Hábitos de crecimiento	6
2.2.6 Hojas	7
2.2.7 Flor	7
2.2.8 Fruto	<del>7</del> 8
2.3 Manejo del cultivo	8
2.3.1 Semillero en suelo	8
2.3.2 Semillero en bandejas (charolas)	<del>8</del> 9
2.3.3 Densidad de población	9
2.3.4 Trasplante	9
2.3.5 Control de maleza	9
2.3.6 Aporcado y rehundido	10
2.3.7 Tutorado	10
2.3.8 Poda de brotes laterales	11
2.3.9 Poda de hojas	11
2.3.10 Poda de yema o ápice principal	12
2.3.11 Aclareo de flores y frutos	12

2.4 Cosecha	12
2.4.1 Operaciones de cosecha	13
2.4.2 Post-cosecha	13
2.5 Manejo fitosanitario en invernadero	14
2.6 Producción en ambientes protegidos	15
2.7 Invernaderos	15
2.7.1 Tipos de invernaderos	16
2.7.2 Relación del tipo de invernadero con el clima del lugar	17
2.7.3 Ventajas de los invernaderos para la producción de tomate	17
2.7.4 Desventajas de la producción en invernadero	18
2.7.5 Sistemas de producción en invernadero	18
2.8 Hidroponía	19
2.8.1 Sistemas hidropónicos	19
2.8.1.1 Sistemas hidropónicos abiertos	21
2.8.1.2 Sistemas hidropónicos cerrados	22
2.8.2 Sustrato	23
2.8.3 Solución nutritiva	24
2.8.3.1 Composición química	25
2.8.3.2 Relación mutua entre los aniones	25
2.8.3.3 Relación mutua entre los cationes	<del>25</del> 25
2.8.3.4 Alcalinidad o acidez de la solución nutritiva (pH)	26
2.8.3.5 Conductividad eléctrica (CE)	26
2.8.3.6 Temperatura de la solución nutritiva	26
2.8.3.7 Oxigenación	27
2.8.3.8 Presión osmótica y potencial osmótico	27
2.8.3.9 Sanidad	28
2.8.3.10 Principales soluciones nutritivas utilizadas en hidroponía	28
2.8.4 Enfermedades más comunes del tomate cultivado en hidroponía	29
2.8.4.1 Manejo y prevención de enfermedades en cultivos hidropónicos	32
III. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Ubicación y condiciones ambientales en que se llevó a cabo la investigación	33
3.2 Tratamientos y diseño experimental	33
3.3 Material vegetal y sistema de producción	35
3.4 Manejo de la solución nutritiva durante el experimento	35
3.5 Variables medidas en la planta	36
3.5.1 Longitud de tallo (LT) y diámetro de tallo (DT)	36
3.5.2 Rendimiento	36



3.5.3	Número de frutos por planta	37
3.5.4	Tamaño de frutos	37
3.5.5	Peso de frutos	37
3.6	Variables medidas en la calidad de fruto	37
3.6.1	Conductividad eléctrica de fruto	38
3.6.2	pH de jugo	38
3.6.3	Acidez titulable (AT %)	38
3.6.4	Sólidos solubles totales (SST) en grados Brix	<u>3938</u>
3.6.5	Índice de madurez	39
3.6.6	Porcentaje de pérdida de peso	39
3.7	Variables medidas en la solución nutritiva	39
3.7.1	Conductividad eléctrica (CE) y potencial de hidrógeno (pH)	39
3.7.2	Volumen de solución aplicada	40
3.7.3	Volumen de solución drenada	40
3.7.4	Porcentaje de drenaje	40
3.7.5	Cantidad de fertilizante.	40
3.8	Análisis estadístico	41
3.9	Evaluación financiera	41
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1	En la planta	42
4.1.1	Longitud de tallo (LT) y diámetro de tallo (DT)	42
4.1.2	Rendimiento	42
4.1.3	Número de frutos	43
4.1.4	Tamaño de frutos	43
4.1.5	Peso de frutos	43
4.2	En calidad de fruto	44
4.2.1	Conductividad eléctrica	44
4.2.2	pH de jugo	<u>4544</u>
4.2.3	Acidez titulable (AT %)	45
4.2.4	Sólidos solubles totales (SST) en grados Brix	45
4.2.5	Índice de madurez (IM)	46
4.2.6	Porcentaje de pérdida de peso	47
4.3	En solución nutritiva	47
4.3.1	Conductividad eléctrica (CE) y potencial de hidrógeno (pH)	47

	X
4.3.2 Volumen de solución aplicada y drenada	48
4.3.3 Porcentaje de drenaje	49
4.3.4 Cantidad de fertilizante	49
4.3.5 Evaluación financiera	50
V. CONCLUSIONES	51
VI. LITERATURA CITADA	52
VII. APÉNDICE	64

## ÍNDICE DE CUADROS

No. de Cuadro	Título de Cuadro	Página
1	Concentración de nutrimentos en algunas de las principales soluciones nutritivas (ppm).	29
2	Diámetro y longitud de tallo promedios durante el ciclo de tomate para sistemas hidropónicos cerrado y abierto.	42
3	Rendimiento de frutos de tomate en sistemas hidropónicos cerrado y abierto en 20 cortes realizados en el ciclo de producción.	44
4	Efecto de sistemas hidropónicos abierto y cerrado en calidad de fruto de tomate.	46
5	Pérdida promedio de peso en frutos por semana, en porcentaje, producidos en sistemas hidropónicos abierto y cerrado con tres índices de madurez.	47
6	Conductividad eléctrica, pH, volumen de SN aplicado y drenado y porcentaje de drenaje en sistemas hidropónicos abierto y cerrado con cultivo de tomate.	48
7	Cantidad de solución nutritiva aplicada y drenada, porcentaje de SN drenada, cantidad de fertilizante aplicado y perdido en la solución drenada, productividad del agua y productividad de los fertilizantes para producir tomate en un sistema hidropónico cerrado y otro abierto, en invernadero. n = 4.	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

No. de Figura	Título de Figura	Página
1	Establecimiento de sistemas hidropónicos abierto y cerrado en cultivo de tomate.	34
2	Vistas lateral y frontal de sistemas hidropónicos cerrado y abierto.	35

## ÍNDICE DE CUADROS EN APÉNDICE

No. de Cuadro	Título de Cuadro	Página
1A	Número de frutos, diámetros polar y ecuatorial, peso y categorización de frutos en sistemas hidropónicos abierto y cerrado en cultivo de tomate.	64
2A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para número de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	65
3A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para diámetro polar de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	65
4A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para diámetro ecuatorial de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	66
5A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para peso de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	66
6A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para rendimiento en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	66
7A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para sólidos solubles totales de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	67
8A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para potencial de hidrógeno de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	67
9A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para conductividad eléctrica de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	67
10A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para acidez titulable de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	68
11A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para índice de madurez de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.	68
12A	Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos siete días después de la cosecha en tres	68

	<b>índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.</b>	
<b>13A</b>	<b>Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos catorce días después de la cosecha en tres índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.</b>	<b>69</b>
<b>14A</b>	<b>Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos veintiuno días después de la cosecha en tres índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.</b>	<b>69</b>
<b>15 A</b>	<b>Tasa interna de retorno y valor actual neto para un periodo de 10 años en sistemas hidropónicos abierto y cerrado.</b>	<b>70</b>

## RESUMEN

El tomate o jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) es una de las hortalizas más importantes del mundo y su cultivo va en aumento, principalmente en invernaderos e hidroponía donde se tiene una alternativa de producción y oportunidad de comercialización. Los sistemas hidropónicos son abiertos, cuando el exceso de solución nutritiva drenada no es reusado y es desechado, y son cerrados, cuando la solución nutritiva excedente es recuperada y reusada. El objetivo de investigación fue conocer las diferencias en producción y calidad de frutos en un sistema hidropónico cerrado en comparación con uno abierto, en el cultivo de tomate de variedad El Cid, utilizando macetas con sustrato perlita fina previamente utilizado. La investigación se realizó en el año 2015 en la Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Se midió el crecimiento de la planta (longitud y diámetro de tallo); la producción de frutos (número, tamaño, peso y rendimiento de frutos); y la calidad de los frutos (conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno, acidez, sólidos solubles totales, e índice de madurez en el zumo y pérdida de peso de fruto) en dos etapas de la producción en tres índices de madurez. Las variables de crecimiento se mantuvieron dentro de parámetros normales y adecuados. No hubo diferencia significativa en las variables de calidad evaluadas en los tres índices de madurez de los frutos medidos en dos etapas. Hubo diferencia significativa sólo para el diámetro ecuatorial de fruto, sin embargo, no para diámetro polar, número y peso de frutos y rendimiento, por lo cual el sistema cerrado es una alternativa de producción potencialmente comparable con el sistema abierto. Con el sistema hidropónico cerrado no se afecta el rendimiento ni la calidad de los frutos producidos, pero si se obtiene un ahorro de 26.81 % de agua y 28.9 % de fertilizantes, lo cual representa una tasa de rentabilidad 22.2 % mayor respecto al sistema hidropónico abierto.

**Palabras clave:** *Lycopersicum esculentum* Mill, Recirculación, Solución nutritiva, Reutilización, Hidroponía.

## ABSTRACT

Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Is one of the most important vegetables in the world and its cultivation is increasing, mainly in greenhouses and hydroponics where you have an alternative production and marketing opportunity. Hydroponic systems are open, when excess nutrient solution drained is not reused and is discarded, and are closed, when excess nutrient solution is recovered and reused. The objective of the research was to know the differences in fruit production and quality in a closed hydroponic system compared to an open one, in the tomato crop of the El Cid variety, using pots with thin perlite substrate previously used. The research was carried out in 2015 in the Academic Unit of Agronomy of the Autonomous University of Zacatecas. Plant growth (stem length and diameter) was measured; Fruit production (number, size, weight and yield of fruits); And fruit quality (electrical conductivity, hydrogen potential, acidity, total soluble solids, and fruit maturity index and fruit weight loss) in two stages of production in three maturity indices. Growth variables were maintained within normal and adequate parameters. There was no significant difference in the quality variables evaluated in the three maturity indices of the fruits measured in two stages. There was significant difference only for the equatorial diameter of fruit, however, not for polar diameter, number and weight of fruits and yield, so the closed system is a production alternative potentially comparable to the open system. With the closed hydrological system, neither the yield nor the quality of the fruits produced is affected, but it does obtain a saving of 26.81% of water and 28.9% of fertilizers, which represents a rental rate of 22.2% greater than the open hydroponic system.

**Key words:** *Lycopersicon esculentum* Mill, Recirculation, Nutrient solution, Reuse, Hydroponics.

## I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes y extendidos en todo el mundo (Al-Omran *et al.*, 2010); debido a que su consumo ha ido aumentando gradualmente, es necesario buscar las mejores técnicas de manejo para poder obtener los más altos rendimientos económicos y el abastecimiento de la demanda social (Alviter y Granados, 2005; Morgan, 2003) con el menor uso de recursos naturales, principalmente agua y de insumos, principalmente fertilizantes (Durán *et al.*, 2014).

En México existen alrededor de 20,000 unidades bajo agricultura protegida de las cuales 66 % corresponden a invernaderos y el otro 34 % a otras estructuras como macro túneles, casa sombra, micro túneles, techo sombra, etc. La producción nacional es de 1, 180,052 ton, esta producción en el país se obtuvo de una superficie sembrada total de 48,234.01 ha y una cosechada de 23,764 ha, con un rendimiento promedio de 50.753 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2016). El sistema de producción puede ser a cielo abierto, directamente en el suelo, o en invernadero (Quintero *et al.*, 2006). Sin embargo, el uso de invernaderos representa una alternativa de producción y una oportunidad de comercialización de los productos cultivados bajo estos sistemas ya que, además de ofrecer protección contra las condiciones adversas del clima a los cultivos, se pueden obtener altos rendimientos y calidad del producto comercial. Para lograr esto es importante considerar los factores que influyen directamente en la productividad y la calidad del tomate de invernadero, tales como: luz, suelo, temperatura, humedad relativa y ventilación; así como los aspectos del manejo del cultivo y los problemas fitosanitarios (Garza y Molina, 2008). Para tener un mayor control fitosanitario por una parte y por otra una mejor disponibilidad de nutrimentos y agua para el cultivo, el suelo es sustituido en el sistema de producción por otros materiales conocidos como sustratos, que pueden ser naturales o sintéticos y minerales u orgánicos (Mata-Vázquez *et al.*, 2010; Segura-Castruita *et al.*, 2011).

La mayoría de los cultivos en invernadero se han desarrollado utilizando sustratos artificiales en sistemas hidropónicos, estos sustratos son preferidos al suelo por sus características fisicoquímicas, ya que en ellos se puede tener mejor control sobre el agua, la aireación, la nutrición y distribución de las raíces (Ehret *et al.*, 2001; Durán *et al.*, 2014). Estos sistemas de cultivo se caracterizan por no requerir de suelo, por lo que representan una alternativa en los lugares donde el mismo se ha degradado o presenta deficiencias



físicas o químicas; además, permiten hacer uso más eficiente del agua (Velasco *et al.*, 2012).

La hidroponía es una tecnología que se usa para desarrollar plantas en solución nutritiva (SN) (agua y nutrimentos), con o sin el uso de un medio o sustrato (arena, grava, vermiculita, lana de roca, etc.) para proveer soporte mecánico a la planta. Es esencial que la SN tenga la proporción adecuada (en aniones y cationes), necesaria para que las plantas absorban los nutrimentos (Favela *et al.*, 2006; Baca-Castillo *et al.*, 2016). El uso de sistemas hidropónicos para la producción de hortalizas en invernadero es ideal pues tiene un alto grado de eficiencia en el uso del agua por la disminución de percolación y evaporación; además el área de riego es reducida, debido a que el crecimiento radical no necesita ser en exceso, ya que tienen más accesibles los nutrimentos porque estos llegan directamente a las raíces, en las formas químicas que son absorbidos y en las cantidades óptimas (López *et al.*, 2011).

Los sistemas hidropónicos han sido clasificados como abiertos, donde el exceso de la SN que drena no es reusado y es dirigido al suelo y a las aguas subterráneas, y sistemas cerrados, donde la SN excedente es recuperada, regenerada y reciclada en un sistema de recirculación cíclico (Ehret *et al.*, 2001; Massa *et al.*, 2010).

Los sistemas donde no hay recirculación de la SN (abiertos), a menudo han sido vistos como derrochadores de SN, debido al exceso de solución drenada como desecho, esto trae como consecuencia una elevación de costos y contaminación del suelo y aguas subterráneas donde es descargado este desecho (Morgan, 2003; Massa *et al.*, 2010; Pardossi *et al.*, 2011; Durán *et al.*, 2014; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a).

En los sistemas hidropónicos cerrados es más eficiente que en otros sistemas (abierto) el uso del agua y los nutrimentos que se aplican para el crecimiento y desarrollo de un cultivo (Pardossi *et al.*, 2011; Durán *et al.*, 2014); sin embargo, un aspecto que limita la reutilización de la SN y con esto la eficiencia en el uso del agua y de los nutrimentos es la acumulación de sales que se puede presentar causando fitotoxicidad y el riesgo de diseminación de microorganismos que atacan la raíz del cultivo (Tüzell *et al.*, 2009; Massa *et al.*, 2010; Rosberg, 2014; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a). En un sistema cerrado es fundamental mantener una conductividad eléctrica correcta (1.5 a 3.5 deci-Simens por metro) durante el ciclo de cultivo, que en el tomate de crecimiento indeterminado es hasta 11 meses, lo cual puede resultar técnicamente complicado y, debido al ciclo tan largo, las plantas están expuestas a enfermedades por más tiempo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014b).

Algunos trabajos de investigación realizados en sistemas con recirculación han mostrado rendimientos de entre 15.3 y 16.7 kilogramos de tomate por metro cuadrado en ciclos cortos. Además los sistemas cerrados han mostrado un ahorro en fertilizante y agua de un 41 % y 35 % respectivamente, en comparación con los sistemas sin recirculación (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a).

### **1.1 Planteamiento del problema**

La mayor parte del agua utilizada en agricultura protegida en el país y en particular en el estado de Zacatecas (100 %) proviene de los mantos acuíferos, lamentablemente el 44 % de ellos está sobreexplotado (CNA, 2011).

Los sistemas donde no hay recirculación de la SN (abiertos), actualmente están siendo vistos como derrochadores de SN debido al exceso que drena del sustrato como desecho, esto trae como consecuencia una elevación de costos y contaminación del suelo y aguas subterráneas donde es descargado este desecho (Massa *et al.*, 2010; Pardossi *et al.*, 2011; Durán *et al.*, 2014).

Debido a que el uso del sistema hidropónico cerrado representa un aparente riesgo de pérdida económica a diferencia del sistema abierto, su aplicación a nivel comercial es reducida, ya que el productor busca seguridad al momento de producir bajo condiciones de invernadero; la tendencia en el uso de un sistema abierto orienta al productor a menospreciar el sistema cerrado para evitar problemas de bajo rendimiento, fitosanidad, o fitotoxicidad, debido a esto, es necesario buscar alternativas para eficientar el uso del agua, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria.

Existe poca información sobre el buen manejo de los sistemas cerrados para reducir el impacto de sus desventajas, por lo cual no son tan aceptados como los abiertos.

### **1.2 Justificación**

Ante los problemas fitosanitarios en los suelos que tienen los productores de hortalizas en invernadero en diversas entidades del país y concretamente en la empresa Vicozac, han optado por producir sin suelo, en un sistema hidropónico abierto, con el uso de perlita como sustrato, sin embargo pierden mediante el desecho de SN aproximadamente 50 % de agua y fertilizantes. En este trabajo de investigación se comparan los dos sistemas hidropónicos, abierto y cerrado, ya que es importante generar información para dilucidar si el sistema

cerrado es menos productivo que el abierto y cuál es el mejor manejo que se debe dar a un sistema hidropónico cerrado para disminuir al máximo los riesgos que este sistema puede presentar, debido a que dichos riesgos son un problema para el cual la industria productora de hortalizas demanda una solución.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Comparar producción y calidad de frutos entre un sistema hidropónico abierto y uno cerrado, utilizando un cultivo de tomate y como sustrato perlita reutilizada de tres ciclos anteriores de producción.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Evaluar variables de crecimiento de las plantas y producción de frutos de tomate obtenida en un sistema hidropónico cerrado comparada con la de un sistema abierto que puedan dilucidar si un sistema es más productivo que otro.

Determinar las propiedades que determinan la calidad de los frutos de tomate producidos en un sistema hidropónico cerrado y compararla con la de un sistema hidropónico abierto, para poder determinar si existe diferencia entre ambos.

Medir la producción de tomate en ambos sistemas hidropónicos, utilizando un sustrato reutilizado sin desinfección.

### **1.4 Hipótesis**

El rendimiento de frutos de tomate, expresado en kilogramos por metro cuadrado, no es diferente entre los sistemas hidropónicos abierto y cerrado.

La calidad de los frutos de tomate producidos en un sistema hidropónico cerrado no es diferente respecto a los producidos en un sistema abierto.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 El tomate

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es una de las especies hortícolas de mayor importancia a nivel mundial, por la gran diversidad de subproductos que se obtiene de él tanto en fresco como de manera industrial, así como también por la gran cantidad de divisas que genera. El cultivo de esta hortaliza contribuye de una manera muy importante no solo como generador de divisas, sino también promoviendo una derrama económica al crear y fomentar el empleo de trabajadores dedicados a la agricultura y también involucrar otras ramas de la actividad económica (transporte, empaquetadoras, procesadoras, mercados, entre otras), lo que repercute benéficamente en la sociedad y en la economía de la misma (Albornoz *et al.*, 2007; Bonilla-Barrientos *et al.*, 2014).

### 2.2 Generalidades del tomate

#### 2.2.1 Origen y domesticación del tomate

El tomate es una planta que tiene su origen en América, al parecer de la zona norte de Perú-Ecuador. Su nombre como tal se deriva de dos términos aztecas que son “tomatl”, “xitomate”. México está considerado como el centro de domesticación de esta hortaliza de mayor importancia a nivel mundial (Ojo de Agua, 2007; Blancard, 2011).

#### 2.2.2 Importancia del cultivo

El tomate es una de las hortalizas más rentables del mundo, debido a la gran demanda que tiene tanto en la cocina como en la industria a niveles locales, nacionales e internacionales (Cruz-Carrillo *et al.*, 2003).

El tomate es el cultivo hortícola de mayor importancia en México, tanto en el aspecto económico como en el social, por su gran volumen en el mercado así como por la gran cantidad de divisas que genera, además es la hortaliza con la mayor superficie sembrada, por lo que promueve empleos directos e indirectos favoreciendo así el movimiento económico (venta y compra de los insumos necesarios). Este fruto es ampliamente popular debido a la facilidad para ser cultivado, su sabor y relacionado con esto a su gran versatilidad para ser consumido tanto en fresco, como con algún proceso (cocinado, frito, en conserva, en puré, salsa o en polvo como saborizante) (Cruz, 2007).

### 2.2.3 Taxonomía y morfología

La clasificación taxonómica del tomate realizada por Miller en 1788, es la siguiente (ITIS, 2014):

Reino: *Plantae*

Subreino: *Tracheobionta*

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Subclase: *Asteridae*

Orden: *Solanales*

Familia: *Solanaceae*

Género: *Lycopersicum*

Especie: *esculentum*.

### 2.2.4 Sistema radical

La planta de tomate tiene un sistema radicular desarrollado, está formado por una raíz primaria o principal que puede llegar hasta 50-60 cm de profundidad, provista de una gran cantidad de ramificaciones secundarias y reforzada por la presencia de un gran número de raíces adventicias, las cuales se originan desde la base de los tallos (Mondragón, 2007).

### 2.2.5 Hábitos de crecimiento

El tallo de esta hortaliza es anguloso, recubierto en toda su longitud de pubescencia visible, la cual, al ser de naturaleza glandular, le confieren a la planta un olor característico. En un principio el porte del tallo es erguido, hasta que llega un momento en que por simples razones de peso, rastrea sobre el suelo. Maroto (1995), Páez *et al.* (2000) y Blancard (2011) mencionan que el desarrollo del tallo es variable en función de los distintos cultivares, existiendo dos tipos fundamentales de crecimiento:

- Cultivares con tallos de desarrollo determinado o definido, en los que el crecimiento del tallo principal, una vez que ha producido lateralmente varios “pisos” de inflorescencias normalmente, entre cada una o dos hojas, detiene su crecimiento como consecuencia de la formación de una inflorescencia terminal.
- Cultivares con desarrollo indeterminado o indefinido que tienen la particularidad de poseer siempre en su ápice un meristemo de crecimiento que produce un

alargamiento continuado del tallo principal, originando inflorescencia solamente en posición lateral, normalmente cada tres hojas

### **2.2.6 Hojas**

Sus hojas son sencillas, pecioladas de limbo muy hendido, dan la apariencia de compuestas sin serlo, de foliolos lobulados, ovales y acuminados, con bordes dentados, de color verde intenso, en el haz y verde claro en el envés. Sobre el tallo las hojas surgen de modo alterno. Al igual que el tallo también están recubiertas de pelos glandulares. Normalmente aparecen tres hojas por simpodio, es decir entre ramilletes. Las hojas son las responsables de la fotosíntesis por lo que deben tener una buena disposición para una mayor intercepción de la radiación. Por ello es importante que el emparrillado para el entutorado, quede simétricamente establecido y además para que no interfiera con las labores de manejo del cultivo (Blancard, 2011).

### **2.2.7 Flor**

Es perfecta, regular e hipógina y consta de cinco o más sépalos, de igual número de pétalos de color amarillo, y dispuestos de forma helicoidal a intervalos de  $135^\circ$ , de igual número de estambres soldados que se alternan con los pétalos y forman un cono estaminal que envuelve al gineceo, y de un ovario bi o plurilocular. Las flores se agrupan en inflorescencias de tipo racimoso (dicasio), generalmente en número de tres a 10 en variedades comerciales de tomate calibre medio y grande; es frecuente que el eje principal de la inflorescencia se ramifique por debajo de la primera flor formada dando lugar a una inflorescencia compuesta, de forma que se han descrito algunas con más de 300 flores. La primera flor se forma en la yema apical y las demás se disponen lateralmente por debajo de la primera, alrededor del eje principal. La flor se une al eje floral por medio de un pedicelo articulado que contiene la zona de abscisión, que se distingue por un engrosamiento con un pequeño surco originado por una reducción del espesor del córtex. Las inflorescencias se desarrollan cada dos o tres hojas en las axilas (Cásseres, 1981; Vallejo y Estrada, 2004).

### **2.2.8 Fruto**

Los frutos de tomate son bayas carnosas con diferencias en forma (lisos, asurcado, aperado, etc.) e intensidad de coloración rojiza o amarillo en caso de ciertas variedades de tomate cherry, con cavidades o lóculos internos variables en donde se desarrollan las

semillas de forma reniforme y aplanada. La forma, el tamaño y el peso de los frutos, depende de la variedad, aspectos importantes a considerar al momento de definir que cultivar plantar. Normalmente los tomates tipo Beef o bola, pesan de 180 a 260 g. No obstante, ciertos frutos de la variedad Caimán llegan a alcanzar pesos de hasta 850 g. Una vez que las flores han sido polinizadas, los frutos tardan en alcanzar la madurez en torno a los 58 días, esto depende de la variedad y de las condiciones ambientales (Blancard, 2011).

## **2.3 Manejo del cultivo**

### **2.3.1 Semillero en suelo**

En la producción de hortalizas la tendencia es adquirir las plántulas a productores especializados en propagación, cuyo costo es muy similar al que incurriría el productor normal al producir sus propios semilleros. En el caso de producir sus propias plántulas, es importante recordar que el semillero es el lugar de inicio de la vida productiva y reproductiva de una planta; este se debe hacer en recipientes (bandejas o vasos) debidamente adecuados para depositar las semillas y poder brindarles las condiciones óptimas de luz, temperatura, fertilidad y humedad, buscando obtener la mejor emergencia durante sus primeros estados de desarrollo hasta el trasplante al campo. Como en los semilleros viven plantas jóvenes, cuyos tejidos tiernos efectúan una gran actividad fotosintética y son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y humedad, estos deben estar ubicados donde se les pueda brindar los máximos cuidados, ya que las plántulas crecen con rapidez y cualquier alteración de las condiciones ambientales pueden incidir en su desarrollo. Por tanto, lo más conveniente es ubicarlos bajo una cobertura donde se controlen los cambios de temperatura, humedad relativa, agua de lluvia, insectos plaga, enfermedades y la entrada de animales; deben estar además cerca a fuentes de agua, debido a que las semillas y plántulas requieren riegos cortos pero frecuentes, realizados preferiblemente por aspersión (Costales-Menéndez *et al.*, 2007).

### **2.3.2 Semillero en bandejas (charolas)**

Se recomiendan bandejas de 53, 128 o 200 cavidades, con un volumen por cavidad de 37, 28 y 18 cm<sup>3</sup>, respectivamente. Las bandejas de 53 orificios permiten un mayor desarrollo radicular y del follaje; sin embargo, incrementa los costos por plántula, por requerir mayores

cantidades de sustrato por celda y de espacio por plántula en el invernadero. La selección del tipo de bandeja a utilizar dependerá del tamaño final deseado de la plántula, del costo de la bandeja y del tipo y costo del sustrato (Jaramillo *et al.*, 2006; Jaramillo *et al.*, 2012).

### **2.3.3 Densidad de población**

El número de plantas y su distribución topológica en el invernadero es de vital importancia, debido a que es necesario proporcionar a las plantas el espacio adecuado para su óptima producción. Para tomates determinados se pueden manejar de 3 a 16 plantas m<sup>-2</sup> a 10 y 4 racimos, respectivamente; para tomates indeterminados de 3 a 12 plantas a 10 m<sup>-2</sup> y 4 racimos respectivamente (Ucan *et al.*, 2005).

### **2.3.4 Trasplante**

La plántula de tomate está lista para el trasplante entre los 28 y 35 días después de la siembra. Si la plántula fue manejada a temperaturas de 22 a 24°C y con 30 % de sombra, las plántulas deben contar con cuatro hojas verdaderas y, de preferencia, el tallo debe estar ligeramente lignificado, lo cual se consigue disminuyendo los riegos en los últimos siete días antes del trasplante (Mondragón, 2007).

### **2.3.5 Control de maleza**

La aplicación de herbicidas dentro del invernadero no es aconsejable debido a la residualidad que pueden generar estos productos; no obstante, su utilización se justifica cuando se inicia por primera vez el cultivo y el terreno donde se construye el invernadero está cubierto de malezas o pastos que no son fáciles de erradicar. Por esta razón se debe resaltar la necesidad de controlar las malas hierbas adecuadamente y a tiempo, para que no se vuelvan un problema incontrolable. En primer lugar, la mejor forma de combatir las malezas es antes de la siembra o trasplante, lo cual debe planearse con anterioridad tomando en cuenta el periodo necesario para que la maleza crezca hasta el punto donde sea más vulnerable y pueda ser controlada con eficacia (Jaramillo *et al.*, 2012). Jaramillo *et al.* (2012) mencionan que las Malezas pueden ser combatidas de la siguiente manera:



- **Control manual:** con herramientas manuales (Cuma, azadón, etc.). Se recomienda hacer controles manuales sólo en la línea de siembra, donde va la manguera de goteo, teniendo cuidado de no romperla.

- **Control mecánico:** Se utiliza tractor o cultivadoras con motor. También se puede utilizar equipos con tracción animal. Esta se hace principalmente en las calles. Se recomiendan dos limpiezas, a los 20 y 35 días después del trasplante.

- **Control químico:** Se utilizan herbicidas selectivos o quemantes.

### 2.3.6 Aporcado y rehundido

Práctica que se realiza en suelos enarenados tras la poda de formación, con el fin de favorecer la formación de un mayor número de raíces, y que consiste en cubrir la parte inferior de la planta con arena. El rehundido es una variante del aporcado que se lleva a cabo doblando la planta, tras haber sido ligeramente rascada, hasta que entre en contacto con la tierra, cubriéndola ligeramente con arena, dejando fuera la yema terminal y un par de hojas (Mondragón, 2007).

### 2.3.7 Tutorado

Es una práctica imprescindible para mantener la planta erguida y evitar que las hojas y sobre todo los frutos toquen el suelo, mejorando así la aireación general de la planta y favoreciendo el aprovechamiento de la radiación y la realización de las labores culturales (destallado, recolección, etc.). Todo ello repercutirá en la producción final, calidad del fruto y control de las enfermedades (Carrillo *et al.*, 2003). Cepeda (2009) menciona que la sujeción suele realizarse con hilo de polipropileno (rafia) sujeto de un extremo a la zona basal de la planta (liado, anudado o sujeto mediante anillos) y de otro a un alambre situado a determinada altura por encima de la planta (1.8 a 2.4 m sobre el suelo). Conforme la planta va creciendo se va liando o sujetando al hilo tutor mediante anillos de plástico, hasta que la planta alcance el alambre. A partir de este momento existen tres opciones:

- Bajar la planta descolgando el hilo, lo cual conlleva un coste adicional en mano de obra. Este sistema está empezando a introducirse con la utilización de un

mecanismo de sujeción denominado “holandés” o “de perchas”, que consiste en colocar las perchas con hilo enrollado alrededor de ellas para ir dejándolo caer conforme la planta va creciendo, sujetándola al hilo mediante clips. De esta forma la planta siempre se desarrolla hacia arriba, recibiendo el máximo de luminosidad, por lo que incide en una mejora de la calidad del fruto y un incremento de la producción.

- Dejar que la planta crezca cayendo por propia gravedad.
- Dejar que la planta vaya creciendo horizontalmente sobre los alambres del emparrillado.

### **2.3.8 Poda de brotes laterales**

Las plantas de crecimiento indeterminado se caracterizan por su largo ciclo de vida y porque de cada uno de sus brotes se origina una nueva planta también de crecimiento indeterminado. El problema de dejar desarrollar todos los brotes es la gran competencia que se genera, al interior de la planta por agua, luz, y nutrientes. Para que esto no suceda, las plantas se pueden podar a uno, dos o tres tallos, siendo estos los que van a desarrollar los frutos. Si dejamos a la planta a un solo tallo, los brotes laterales que van apareciendo se van eliminando; es recomendable la poda semanal o cuando los brotes tienen de 5 a 10 cm de longitud. Las heridas causadas por la poda se deben desinfectar con algún fungicida en solución concentrada o en forma de pasta. O bien, cuando son superficies extensas, se puede hacer una aplicación de fungicida foliar después de terminar la poda (Quintana-Baquero *et al.*, 2010).

### **2.3.9 Poda de hojas**

En las variedades de hábito de crecimiento indeterminado la poda de hojas consiste en eliminar las hojas viejas. Dado que en un sistema de producción intensiva de tomate se hace uso de altas densidades de plantas, la poda de hojas es obligada. De no realizarse esta práctica, se genera un micro ambiente de alta humedad relativa en la parte inferior de las plantas, que por un lado es propicio para el desarrollo de enfermedades foliares como el tizón tardío y botrítis y, por el otro, disminuye la penetración de la luz, que retarda la maduración de los frutos. Esta práctica se inicia con la eliminación de las hojas más viejas y de preferencia deben ser de dos a tres las que se eliminarán. Después de la poda no

deben dejarse hojas o brotes en el área interior del invernadero, para evitar la diseminación de enfermedades (Quintana-Baquero *et al.*, 2010).

### **2.3.10 Poda de yema o ápice principal**

Consiste en cortar la yema principal de la planta teniendo en cuenta que el racimo que esté por debajo de dicha yema se encuentre totalmente formado. Se deben dejar dos hojas por encima del último racimo. Esta poda permite determinar el número de racimos que se van a dejar por planta; se puede llevar la producción a 8 - 16 racimos o más, dependiendo del estado sanitario de la planta, las condiciones ambientales, la productividad del material y la calidad comercial exigida por los mercados. Generalmente el tamaño de los frutos de los últimos racimos es mucho menor, por lo cual la poda terminal permite que los últimos frutos adquieran un mayor tamaño si no se consigue a través de una adecuada fertilización. Usualmente la poda de yema terminal incrementa el diámetro de los frutos en las tres últimas inflorescencias (Ucan *et al.*, 2005).

### **2.3.11 Aclareo de flores y frutos**

El objetivo de este tipo de poda es balancear el número y tamaño de los frutos en el racimo y a lo largo de la planta. La poda de flores y frutos va a depender del tipo de mercado que tenga el productor y de la variedad utilizada, pues algunas variedades producen gran número de flores por inflorescencia, los frutos no se desarrollan bien y son de calibres tan pequeños que no satisfacen la demanda del mercado. En este caso, se recomienda eliminar flores antes de que sean polinizadas (Quintana-Baquero *et al.*, 2010).

## **2.4 Cosecha**

La cosecha debe realizarse cuando la temperatura es más baja, la humedad relativa es alta y hay un nivel de iluminación adecuado. La baja temperatura permite tasas de respiración más bajas, lo cual (sumado a humedades relativas altas) favorece la conservación del producto y reduce la tasa de deterioro. Un buen grado de iluminación permite a los recolectores inspeccionar el producto para asegurarse de cumplir con los requisitos establecidos para su recolección, tanto por el grado de madurez que presenta como por su

estado sanitario y mecánico. La cosecha del tomate es una actividad que influye directamente en la calidad final del fruto. Cualquier manejo inadecuado del producto en esta etapa no podrá ser remediado y, por el contrario, será magnificado en las etapas posteriores. Los tomates destinados al mercado en fresco son cosechados en un estado de madurez acorde con el tiempo entre cosecha y consumo. Cuanto más largo es este periodo (que incluye el transporte, almacenaje y comercialización) más inmaduros deben ser cosechados los frutos. En general, para mercados distantes los frutos son cosechados en estado verde maduro (García *et al.*, 2012).

#### **2.4.1 Operaciones de cosecha**

La planeación y la supervisión durante la cosecha es muy importante para llevar a cabo esta tarea en el menor tiempo posible, exponiendo el producto al menor número de riesgos. Se debe informar al grupo que se encargará de la recolección sobre las características que el tomate debe cumplir para su recolección, así como controlar los hábitos de limpieza y sanidad del personal que recolecta, contar con las instalaciones adecuadas para el aseo de las personas que tienen contacto con el producto e inspeccionar el producto cosechado para retirar aquel que no presente las características mínimas requeridas (García *et al.*, 2012).

#### **2.4.2 Post-cosecha**

El manejo poscosecha incluye todas las técnicas de cosecha, manejo, maduración, almacenamiento y procedimientos de empaque que ayudarán a mantener la calidad de la fruta (características físicas, químicas y biológicas). Los tomates deben cortarse de la planta mediante un doblez cuidadoso y evitando jalonearlo ya que esto causa daño y rasgaduras tanto al fruto como a la planta. Es muy importante considerar la cantidad de fruto que se piensa cosechar a diario para contar con el número adecuado de contenedores para su traslado al empaque. Dentro de las operaciones de empaque los tomates son lavados, desinfectados, secados, inspeccionados por defectos y encerados para reducir al máximo la pérdida de agua y proporcionarles un lustre para su apariencia. Los frutos son clasificados nuevamente por tamaño y color antes de ser enviados a los bancos para su empaque en cajas de cartón. El llenado de las cajas es una operación crítica y debe ser cuidadosamente supervisada. El producto puede ser machucado cuando se cierra una caja sobrellena,

mientras que si está muy vacía puede resultar en daños mecánicos severos debido al movimiento durante el envío y manejo. El estibado promueve eficiencia en el sistema de distribución y reduce daños mecánicos eliminando transferencias y reduciendo el número de tamaños de cajas enviadas (Siller, 2004).

## **2.5 Manejo fitosanitario en invernadero**

Es muy importante tener un buen manejo dentro del invernadero para poder controlar pero sobre todo prevenir la presencia de plagas y enfermedades que puedan atacar al cultivo de tomate, para esto es necesario implementar una serie de conocimientos y técnicas como el control biológico, prácticas culturales, el uso de trampas de feromonas, atrayentes, repelentes, o cualquier otro método que sin deteriorar el ambiente, contribuya a reducir las poblaciones de plaga o enfermedad a niveles no perjudiciales, teniendo en cuenta que estas medidas se deben tomar antes, durante y después del cultivo y no cuando aparezca la plaga o enfermedad (Jaramillo et al., 2007).

Algunas de las técnicas más importantes en la prevención de plagas y enfermedades bajo cubiertas protegidas (invernadero) incluyen en primer lugar tener un diseño y condición (plástico en buenas condiciones, sin rasgaduras y limpios) adecuados de la misma, que permita tener una ventilación adecuada de la zona de producción y tener un buen control de las temperaturas ya que cambios drásticos o niveles excesivos suele favorecer la aparición de plagas y enfermedades. El buen mantenimiento del sistema de riego es importante ya que fugas o mala condición del equipo puede favorecer una alta humedad que puede propiciar enfermedades. Por otra parte, es importante también mantener una buena higiene personal, utilizando cubiertas (overoles), guantes, tapabocas, cofia, fundas de zapatos estériles, tapetes sanitarios, jabón y gel antibacterial en personal que tenga acceso a la zona de producción; así como también, mantener en condiciones de sanidad los materiales utilizados en el proceso de producción (semilla, plántulas, herramientas, agua de riego, etc.) ya que suelen ser los vehículos con mayor potencialidad en la inoculación de agentes infecciosos. De igual manera, es recomendable aplicar técnicas de control biológico como lo son la liberación de enemigos naturales de las plagas y enfermedades como insectos (parásitos y depredadores), microorganismos (hongos y bacterias entomopatógenos, organismos sinérgicos, etc.) y extractos (cebos, atrayentes, repelentes, antiapetitivos, etc.) controladores de plagas y enfermedades. El control químico, puede ser una buena medida de control pero debe ser la última opción considerada, ya que de no

aplicarse de manera adecuada y consiente, puede provocar efectos negativos no solo al cultivo establecido, sino también a todo el medio ambiente presente en el área de producción; además de que un mal manejo con este tipo de control puede resultar contraproducente ya que puede provocar una adaptación de resistencia por parte de las plagas y enfermedades atacadas con los productos químicos haciéndolos más difíciles de controlar (Abbasi et al., 2002; Jaramillo et al., 2007; Khalil y Alsanius, 2010; Abdel-Monaim et al., 2012).

## **2.6 Producción en ambientes protegidos**

La agricultura protegida tiene como objetivo actuar o modificar el microclima que rodea la planta (radiación solar, temperaturas aérea y del suelo, humedad relativa, entre otros) para que ésta pueda desarrollarse y dar su máximo rendimiento posible durante todo su ciclo de vida (sistema semiforzado) o parte de él (sistema forzado) (Martínez y Garbi, 2015).

Al producir en agricultura protegida se utilizan materiales que permitan adaptarse a las estructuras de protección (plásticos, mallas, etc), con el fin de controlar artificialmente un espacio. Las hortalizas mayormente producidas en ambientes protegidos son: el tomate, pimiento, pepino y berenjena, debido a que estas hortalizas son producidas en mayor cantidad, ya que ocupan el 80 % de la producción total, seguidas por las flores y especias (Sánchez et al., 2011).

Entre las ventajas más importantes de producir en ambientes protegidos se encuentran: permiten el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, se enfrenta con éxito plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, productos sanos y con un mejor precio en los mercados, generando así evidentemente un mejor ingreso para los productores (Reséndiz et al., 2011).

## **2.7 Invernaderos**

Se considera invernadero a toda aquella estructura cerrada con cubierta de materiales transparentes o difusos que permiten el paso de la luz, dentro de la cual es posible controlar las condiciones climáticas internas (López et al., 2011).

La finalidad de un invernadero es mantener las condiciones ambientales favorables para incrementar la producción de un cultivo, elevando así el ingreso económico al productor. El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es la hortaliza mayormente producida en el mundo y es el cultivo que mayormente se establece en invernadero (Al-Omran et al., 2010; Padilla-Bernal et al., 2012); el uso de invernaderos con hidroponía representa una técnica que

permite obtener volúmenes más altos por cada unidad de superficie producida (Magaña-Lira *et al.*, 2013).

Los invernaderos se pueden clasificar de distintas formas, según se atiende a determinadas características de sus elementos constructivos (por su perfil externo, según su fijación o movilidad, por el material de cubierta, según el material de la estructura, etc.).

### 2.7.1 Tipos de invernaderos

**Invernaderos autóctonos:** Construidos con la experiencia en el uso de los materiales locales de los instaladores de cada zona. En muchos casos, en el diseño de estos invernaderos ha predominado la tradición constructiva de una zona determinada sobre la racionalidad científico-técnica. La madera es su principal elemento estructural, el invernadero parral y sus versiones derivadas del diseño original plano es el ejemplo más extendido de invernadero autóctono. (Montero, 2012).

**Plano o tipo parral:** utilizado en zonas poco lluviosas, la estructura está construida por dos partes claramente diferenciadas, una estructura vertical y otra horizontal, asemejándose a los tendidos de alambre usados en los parrales para uva, de ahí su nombre (Castilla, 2007).

**Invernaderos industriales:** Este tipo de estructuras son modulares, estables y duraderas, con materiales de recubrimiento que conservan la hermeticidad y la energía. Están concebidas para permitir la instalación de accesorios de control ambiental (Muñoz, 2009).

**Raspa y amagado:** es típico de Almería y basa su éxito en su sencillez y bajo costo. Similar al tipo parral pero varía la forma de la cubierta. Se aumenta la altura máxima en la cumbre, formando lo que se le llama raspa. En la parte baja, conocida como amagado, se unen las mallas de la cubierta al suelo (Castilla, 2007).

**Invernadero multitúnel:** Ventilación mejor que los parrales. Suelen tener una ventana cenital por cada nave, o en ocasiones dos (Montero, 2012). Su inconveniente es la acumulación de condensación por su baja pendiente en el plástico (Muñoz, 2009).

**Invernadero asimétrico o inacral:** Similar a raspa y amagado, difiriendo de la superficie de una cara con la finalidad de aumentar su capacidad de captación de la radiación solar (Ortiz, 2010).

**Invernadero de capilla:** Tiene la techumbre formando uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas. La ventilación es por ventanas frontales y laterales (Ortiz, 2010).

**Invernadero de vidrio:** Estructuras originalmente desarrolladas en Holanda. La cubierta de este invernadero es con paneles de vidrio que descansan sobre las canaletas de captación de precipitaciones y sobre barras transversales. El ancho de cada módulo es de 3.2 m. este tipo de estructuras no llegan a 100 ha en México (menos de 1 % de agricultura protegida) (Muñoz, 2009).

### **2.7.2 Relación del tipo de invernadero con el clima del lugar**

La altura ideal de los invernaderos es de 3.5 m en su parte central para tener un gran volumen de aire que facilite el manejo climático y que genere un efecto de colchón para el enfriamiento, calentamiento y humedad ambiental.

Los invernaderos deben estar dotados obligatoriamente de una adecuada ventilación cenital, que asegure una superficie de ventilación mínima de un 15-20 % de la superficie total cubierta así como una adecuada renovación de aire. Será conveniente una ventilación perimetral en aquellos casos en que, por la ubicación del invernadero y condiciones particulares de persistencia de periodos de humedad prolongados, lo exigiese. Con el manejo del invernadero, se ajustarán perfectamente las necesidades climáticas de los cultivos, comprendiendo las necesidades de temperatura, humedad relativa e intensidad lumínica. En cuanto a la ubicación del invernadero, muchas veces la pendiente del terreno (topografía) decide su orientación. En los suelos planos es importante considerar la dirección de los vientos predominantes, debiendo orientarlo hacia aquella dirección que presente menos resistencia. El invernadero deberá estar dotado de corriente eléctrica, para poder garantizar un adecuado manejo y control de: riego, fertirriego y control climático (Sanz de Galeano *et al.*, 2003).

### **2.7.3 Ventajas de los invernaderos para la producción de tomate**

Las ventajas principales que se tienen con el uso de invernaderos son: (1) obtener productos agrícolas en áreas donde a campo abierto normalmente no se producen. (2) lograr productos agrícolas fuera de época. (3) con un buen diseño de la estructura equipo y adecuado manejo, se logra aumentar la producción por unidad de superficie, incrementar



el número de ciclos por periodo o año, escalonar los productos con base en fechas, mayor calidad de los productos, trayendo como consecuencia una mayor producción y rentabilidad del sistema. (4) se genera empleo permanente. (5) menor riesgo en la producción. (6) uso más eficiente del agua e insumos. Y (7) mayor control de plagas, maleza y enfermedades (Santos *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2012).

#### **2.7.4 Desventajas de la producción en invernadero**

Entre las desventajas que se pueden encontrar en la producción de tomate en invernadero, las más importantes son: 1.- Inversión inicial alta, 2.- Alto nivel de especialización y capacitación, 3.- Altos costos de producción y 4.- Condiciones óptimas para el ataque de agentes patógenos (Santos *et al.*, 2010; Velasco *et al.*, 2012).

#### **2.7.5 Sistemas de producción en invernadero**

La producción en invernadero ha permitido controlar las condiciones que influyen de manera directa e indirecta sobre la producción de las hortalizas ya que gracias a estas estructuras se puede tener una modificación favorable del clima y suelo, lo que repercute en un mayor rendimiento y calidad del producto comercial (Quintero *et al.*, 2006). El suelo suele ser el medio de cultivo más disponible para las plantas, éste les proporciona un medio de anclaje, nutrientes, aire, agua, flora y fauna y otras características que favorecen el cultivo de plantas (Sengupta y Banerjee, 2012). El producir en Invernadero utilizando el suelo como sustrato permite aumentar los rendimientos normalmente obtenidos en condiciones de cielo abierto, ya que en el caso del tomate se puede triplicar el rendimiento al cultivarlo bajo estas condiciones obteniéndose entre 5 y 8 kg por planta a diferencia de la producción a libre exposición donde se obtienen de 1.5 a 2 kg por planta (Jaramillo *et al.*, 2006).

Por otra parte la producción de hortalizas como el tomate también puede desarrollarse en invernadero bajo sistemas de hidroponía, ya que la producción en suelo puede verse afectada debido a que muchos suelos presentan elevado deterioro de sus propiedades físicas y químicas o bien presentan serios problemas fitosanitarios y son poco productivos, debido a estas limitantes se ha dado una sustitución gradual del suelo por sustratos hidropónicos. El cultivo bajo invernadero requiere de ciertas condiciones para llevarse a cabo y uno de los principales factores que determinan el éxito del cultivo es el medio de crecimiento. Gracias a la producción hidropónica de tomate y otras hortalizas es posible favorecer aún más la nutrición de las plantas cultivadas aumentando el rendimiento y

calidad de sus productos obtenidos, así como hacer un uso eficiente del agua en comparación a la producción en suelo, por lo que resulta una alternativa para la seguridad alimentaria (Rouphael et al., 2004).

## **2.8 Hidroponía**

El vocablo hidroponía proviene de dos palabras griegas, "hydro" que significa agua y "ponos" que significa trabajo, su significado consiste como "cultivo en agua". Se concibe a la hidroponía como una serie de sistemas de producción en donde los nutrientes llegan a la planta a través del agua, son aplicados en forma artificial y el suelo no participa en la nutrición. En la hidroponía a diferencia de la producción en suelo, se logra mayor eficiencia y control del riego y la nutrición mineral, ausencia inicial de plagas, enfermedades y malezas, facilidad de esterilización de los sustratos, posibilidad de usar aguas duras, o con mayor salinidad, mayor rendimiento, calidad, inocuidad y sanidad (Alarcón, 2006; Raviv y Lieth, 2008). En la mayoría de los sistemas hidropónicos establecidos se aplica el riego por goteo con una SN que contiene fertilizantes disueltos con todos los nutrientes minerales esenciales para las plantas, en concentraciones óptimas para su crecimiento y desarrollo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014b; Baca-Castillo *et al.*, 2016). El uso de la hidroponía para hortalizas en invernadero presenta un elevado nivel de eficiencia en el uso del agua, ya que son menores las pérdidas por evaporación y percolación (López *et al.*, 2011). La hidroponía es ampliamente usada en el mundo para la producción de los cultivos más rentables. El tomate es una de las especies hortícolas que más se produce en hidroponía, debido a su elevado potencial productivo, a su demanda nacional y mundial, así como a su alto valor económico (Armenta-Bojórquez *et al.*, 2001). Esa alta productividad es debida en principio al balance entre el oxígeno para la respiración de la raíz, el agua y los nutrientes; además de poder controlar la presencia de malas hierbas, al mayor control sobre las plagas y enfermedades, al mantenimiento del pH dentro de un rango óptimo y a que se permite una mayor densidad de población (Zárate, 2007).

### **2.8.1 Sistemas hidropónicos**

Los sistemas hidropónicos proveen una modalidad de crecimiento de plantas en la cual no se requiere de suelo como medio de cultivo para las mismas. Dependiendo del medio de desarrollo de las raíces del cultivo, los sistemas hidropónicos pueden clasificarse en tres tipos:

**1) Cultivos en agua (solución nutritiva).** Este tipo de sistemas hidropónicos tienen como característica principal la ausencia de cualquier medio de anclaje para las raíces, en los cuales la raíz se desarrolla en un medio acuoso ocasionado por la SN que circula a través de canales fabricados de diversos materiales (PVC, plástico, polietilenos, etc.), dicha SN es suministrada por una bomba a través de goteros generalmente dispuestos a la misma distancia y posición que las plantas cultivadas, formándose una corriente líquida que recorre todo el canal gracias a una pendiente en el mismo satisfaciendo así las necesidades de la planta tanto hídricas como nutrimentales, una vez que la SN llega al final del canal es captada en un colector para ser bombeada nuevamente formando así un sistema hidropónico de ciclo cerrado. Debido a su funcionamiento estos sistemas permiten hacer un uso eficiente del agua y nutrientes debido a la recirculación de la SN y por ende una disminución en los costos de estos insumos, así como también permiten modificar los ciclos de cultivo y maximizar el rendimiento y calidad de los cultivos. Sin embargo el contenido y proporción de sales y oxígeno en la SN son de los factores más importantes a tener en cuenta en este tipo de sistemas. Los sistemas más utilizados en esta modalidad son el NFT (Nutrient Film Technique), el DFT (Deep Flow Technique) y el NGS (New Growing System) (Stutte, 2006; Sengupta y Banerjee, 2012).

**2) Cultivos en aire (aeropónicos).** La aeroponía es un sistema de producción relativamente moderno, el cual es llamado así debido a que las raíces de los cultivos producidos están la mayor parte del tiempo expuestas al aire en completa obscuridad, a ellas se hace llegar la SN a través de riego en forma pulverizada. A diferencia de los sistemas de cultivo en agua (hidropónicos) este sistema no tiene la limitante de la baja oxigenación de las raíces por la inundación con SN ya que posee un alto grado de aireación de las mismas debido a la forma de aplicación de la SN. La cultura aeropónica se practica generalmente en estructuras de agricultura protegida y es adecuado para hortalizas de porte bajo como la lechuga, espinaca, acelga, etc. Los sistemas que se pueden dividir en esta modalidad difieren en el modo de aplicación de la solución, ya que unos la aplican en forma pulverizada y otros en forma de niebla (Martínez *et al.*, 2000; Sengupta y Banerjee, 2012).

**3) Cultivos en sustrato.** En este tipo de sistemas hidropónicos a diferencia de otros las raíces de los cultivos si se desarrollan en un medio sólido que funciona como medio de anclaje llamado sustrato, el cual permite tener un mayor grado de amortiguamiento en aspectos de suma importancia para el desarrollo de la planta, ya que gracias a sus características físicas y químicas se puede tener una porosidad (aireación), retención de la

humedad, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, entre otras, favorables para el desarrollo de la planta. Por otra parte el uso de sustratos permite el desarrollo de las raíces en un medio libre de enfermedades y plagas al inicio del cultivo, característica difícil de lograr cuando se cultiva en suelo (Sengupta y Banerjee, 2012). En los sistemas hidropónicos que utilizan como medios de cultivo sustratos, donde se reutiliza la SN que drena de ellos con un previo reajuste y esterilización de la misma se les conoce como sistemas hidropónicos cerrados, en cambio cuando la SN no se reutiliza y es desechada se les conoce como sistemas hidropónicos abiertos (Alarcón, 2006).

Los sistemas hidropónicos en sustrato tienen un porcentaje de drenaje de SN de aproximadamente 28% respecto a la aplicada, ya que de tener porcentajes de drenaje menores puede ocurrir estrés hídrico y nutricional. El porcentaje de drenaje debe variar dependiendo de la demanda hídrica del cultivo, por las mañanas puede ser de 15% e incrementar progresivamente hasta 40% en las horas del día de mayor demanda, con un promedio diario de 27 a 30%, respecto a la SN aplicada. El porcentaje de drenaje debe de manejarse adecuadamente para satisfacer las necesidades de la planta y al mismo tiempo no provocar un derroche de agua y nutrientes (Vázquez-Gómez-Hernández y Sánchez del Castillo, 2003; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a; Agung y Yuliando, 2015).

### **2.8.1.1 Sistemas hidropónicos abiertos**

Los sistemas hidropónicos en los que se utilizan sustratos se conocen como abiertos cuando el exceso de SN que drena es dirigida al suelo, infiltrándose en el sitio de cultivo o en el mejor de los casos se capta para su uso fuera del invernadero en un cultivo alterno. En este tipo de sistemas no se presentan complicaciones en la composición de la SN como deficiencias o acumulaciones de iones o riesgos en la diseminación de enfermedades ya que siempre se aplica a las plantas cultivadas SN fresca y nueva (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a).

Sin embargo, los sistemas hidropónicos por lo general tienen un drenaje de SN que va desde un 20 % hasta un 40 % de agua y nutrientes, en este tipo de sistemas (abiertos) este porcentaje es desechado, lo que repercute en una elevación en el costo de producción, por esta razón estos sistemas presentan un consumo de estos insumos mayor que aquellos sistemas en los que se reutiliza la SN. Por otro lado estos desechos son causantes de un impacto negativo en el ambiente, debido a que se infiltran hasta que se encuentran con mantos acuíferos contaminándolos con sales, o bien causan alteraciones en las características fisicoquímicas y biológicas del suelo donde son liberados. Los sistemas sin

recirculación de la SN (abiertos), a menudo han sido vistos como derrochadores, debido al exceso de solución drenada como desecho (Morgan, 2003; Gent y Short, 2012; Cuadrado-García *et al.*, 2014).

### **2.8.1.2 Sistemas hidropónicos cerrados**

Los sistemas hidropónicos cerrados en contraste con los abiertos, tienen ventajas importantes porque reúsan la SN después que drena del sustrato, evitándose así la pérdida de la misma por infiltración o lixiviación y también la contaminación al suelo y aguas subterráneas. Además de permitir un bien ambiental, el sistema hidropónico cerrado retribuye al productor económicamente porque disminuye la cantidad de agua y fertilizantes utilizados durante el proceso de producción (Massa *et al.*, 2010; Pardossi *et al.*, 2011; Cuadrado-García *et al.*, 2014; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014b; Moreno-Pérez *et al.*, 2015).

En este tipo de sistemas hidropónicos, la SN es monitoreada y ajustada regularmente para mantener las proporciones adecuadas de nutrientes. Los ajustes más comunes son mantener el volumen de SN, a través de adiciones de agua, los niveles de concentración de nutrientes en base a la conductividad eléctrica, y el pH de la solución (Lykas *et al.*, 2006). En los sistemas hidropónicos cerrados es más eficiente el uso del agua y nutrimentos que en los sistemas abiertos usados para el crecimiento y desarrollo de un cultivo; sin embargo, un aspecto que limita la reutilización de la SN y a la vez la eficiencia en el uso del agua y de los nutrimentos es la acumulación de sales que se puede presentar causando desbalance en la proporción y concentración de la SN provocando deficiencias y por el contrario toxicidades en el cultivo. Por otra parte el uso de estos sistemas presentan un mayor riesgo de enfermedades ya que con la recirculación la SN se puede infectar con algún fitopatógenos, y mediante el mismo proceso (recirculación) diseminarlo a las demás plantas que aún no están enfermas (Schwarz *et al.*, 2010; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a). Sin embargo, De la Rosa-Rodríguez (2014) reportó que, en un ciclo de tomate de ocho meses en un sistema hidropónico cerrado, no se desarrollaron microorganismos fitopatógenos de la raíz, lo cual permite un ahorro importante de agua y nutrimentos sin pérdidas causadas por enfermedades en el cultivo. Además existen tecnologías y sustratos con bajo riesgo de daño por patógenos en el sistema radical de las plantas, que tienen propiedades físicas y químicas favorables, así mismo es importante que los sustratos siempre deben estar libres de patógenos cuando se utilizan por primera vez, cuando son reutilizados deben ser desinfectados, para lo cual existen métodos sencillos, económicos y

poco agresivos al ambiente como el uso de cloro, cuaternarias de amonio, peróxidos, y ácidos paracéticos con los que se consiguen resultados favorables en sustrato y SN (Urrestarazu *et al.*, 2006; Urrestarazu *et al.*, 2007). Con estas medidas, los sistemas cerrados son una alternativa efectiva para la producción intensiva de hortalizas (Mata-Vázquez *et al.*, 2010).

### **2.8.2 Sustrato**

En el proceso de producción hidropónica, uno de los factores principales es el sustrato. El sustrato en hidroponía es todo aquel material distinto del suelo, ya sea natural o de síntesis, residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular de la planta, desarrollando el papel de soporte para la planta. El sustrato puede tener la capacidad de intervenir o no en la nutrición de los cultivos, por esta y otras razones los sustratos han sido clasificados en base a características fisicoquímicas (Ortega-Martínez *et al.*, 2010; Díaz *et al.*, 2013).

Algunos de los principales materiales usados como sustrato son derivados de las siguientes fuentes como la explotación forestal, cuyos materiales son de los más usados como sustrato, entre los que destacan están los productos generados de la limpieza de bosques como el mantillo vegetal, hojas, acículas o bien de la industria de la madera, de la que se obtienen cortezas, aserrín o virutas de madera. Explotación Agrícola, proveedora de restos de cosecha, paja, restos de la caña de azúcar (bagazo), fibra de coco, usados como sustrato. Explotación Animal, generadora de materiales como excrementos (estiércol), piel, lana, etc. Industria Agroalimentaria, principalmente destacan productos generados en molinos de arroz como la cáscara de arroz. Actividades Industriales Diversas, como la industria textil, de la cual se pueden obtener materiales como el algodón, lino, fibras acrílicas o bien de los altos hornos, desechos como escorias de carbón, etc. Núcleos Urbanos, de este tipo de ambientes también es posible obtener materiales aptos como sustrato, algunos de ellos pueden ser algunos tipos de basura, restos de jardinería, etc. Yacimientos Naturales, algunos sustratos pueden ser obtenidos de manera natural por la degradación o acción de organismos naturales, obteniéndose materiales orgánicos como las turbas. Explotaciones Mineras, los desechos emitidos por estas actividades proveen sustratos como la lana de roca, fibra de vidrio, perlita, vermiculita, entre otros. Policarbonatos de Síntesis, dentro de estos se encuentran el poliestireno expandido y los poliuretanos (Pineda-Pineda *et al.*, 2012; Díaz *et al.*, 2013; Galindo *et al.*, 2014).

Los sustratos son fundamentales en proporcionar condiciones más favorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos producidos en sistemas hidropónicos. El uso y elección de los sustratos debe realizarse tomando en cuenta diversos factores que favorezcan más al cultivo a producir como sus características fisicoquímicas, su costo, su disponibilidad, incluso la experiencia que se tenga en su manejo (López-Pérez *et al.*, 2005; Ojodeagua *et al.*, 2008).

Como características principales, los sustratos deben retener humedad, tener disponibilidad de nutrientes, permitir intercambio gaseoso entre su interior y el exterior y funcionar como soporte o medio de anclaje de las plantas que se desarrollan en él, además, deben permitir un balance biológico. Sin embargo, con el paso de los años la pérdida de estas características, particularmente las físicas, se va perdiendo gradualmente, esto debido principalmente a la compactación del sustrato, causado por su manipulación o por los cambios en la humedad, también un sustrato puede degradarse por la alteración en el tamaño de sus partículas, lo cual ocasiona segregación de las más finas al fondo lo que altera las relaciones de porosidad (agua y aire), factor que interviene en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Medrano *et al.*, 2001; Pineda-Pineda *et al.*, 2012). Principalmente con el paso de varios años los sustratos se ven afectados por el riego y el suministro de nutrimentos, en características como porosidad total, volumen de partículas, capacidad de retención de humedad, densidad aparente y capacidad de aireación, siendo esta última la más afectada al paso de dos años y medio (Pineda-Pineda *et al.*, 2012).

### **2.8.3 Solución nutritiva**

La SN consiste en agua con oxígeno y los nutrimentos esenciales en forma iónica. Para que la SN tenga disponibles los nutrimentos que contiene, debe ser una solución verdadera, todos los iones se deben encontrar disueltos. La pérdida por precipitación de una o varias formas iónicas de los nutrimentos puede ocasionar su deficiencia en la planta (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

En hidroponía, las necesidades nutrimentales que tienen las plantas son satisfechas con los nutrimentos que se suministran en la SN. La cantidad de nutrimentos que requieren las plantas depende de la especie, la variedad, la etapa fenológica y las condiciones ambientales (Martínez-Corral, 2009).

Cada especie vegetal que se cultiva en hidroponía requiere de una SN con características específicas. De acuerdo con Martínez-Corral (2009) y Baca-Castillo *et al.* (2016), las principales características que influyen en el desarrollo de los cultivos y sus productos de

importancia económica son: la relación mutua entre los aniones, la relación mutua entre los cationes, la concentración de nutrientes (representada por la CE), el pH, la relación  $\text{NO}_3:\text{NH}_4$  y la temperatura de la SN.

### 2.8.3.1 Composición química

Las soluciones nutritivas utilizadas en sistemas hidropónicos deben contener todos los elementos químicos que las plantas necesitan para su crecimiento y desarrollo, estos son nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, boro, manganeso, zinc, y cobre. Dichos elementos químicos son absorbidos por las plantas en distinta forma iónica (aniones y cationes) y en distintas cantidades para sus funciones fisiológicas. De acuerdo con la cantidad de cada ion requerida por la planta, los nutrientes (iones) han sido clasificados en macronutrientes (requeridos en mayor cantidad) que son amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para absorber nitrógeno, ortofosfato diácido ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y monoácido ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) para absorber fósforo, potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); micronutrientes (requeridos en pequeñas cantidades) que son hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ), cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ), manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$ ), boro ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) y molibdeno ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ); y otros obtenidos del ambiente (agua y aire) que son hidrógeno ( $\text{H}^+$ ), Oxígeno ( $\text{O}_2$ ), Carbono ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ ), cloro ( $\text{Cl}^-$ ) e Hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

### 2.8.3.2 Relación mutua entre los aniones

Se basa en que la SN debe estar balanceada en sus macronutrientes:  $\text{NO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4$  y  $\text{SO}_4$ , para el caso de los aniones. El balance consiste no sólo en la cantidad absoluta de cada uno de ellos, sino, además, en la relación cuantitativa que se establece entre los cationes por una parte y los aniones por la otra (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

Martínez-Corral (2009) y Baca-Castillo *et al.* (2016) señalan, respecto a la concentración de un ion, que el problema más importante es la relación que tiene respecto a los otros dos iones de su misma carga eléctrica; una inadecuada relación entre los iones puede disminuir el rendimiento.

### 2.8.3.3 Relación mutua entre los cationes

Los macronutrientes que contiene la SN en forma de cationes son  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , algunas de las soluciones incluyen al  $\text{NH}_4^+$ . De manera similar a lo explicado para los aniones, la relación mutua entre los cationes contenidos en la planta es dinámica en su



ontogenia. El  $K^+$  disminuye en forma proporcional a la que se incrementa el  $Ca^{2+}$ , el  $Mg^{2+}$  sufre pocos cambios (Martínez-Corral, 2009).

#### **2.8.3.4 Alcalinidad o acidez de la solución nutritiva (pH)**

El nivel de pH influye directamente sobre la absorción de los nutrientes por parte de la planta. Entre los valores de pH 5.5-6.5, se encuentra la mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas. En caso de encontrarnos con valores de pH superiores a 6.5 es posible corregir la SN mediante la acidificación, usando ácido sulfúrico, nítrico o fosfórico, o aplicar hidróxido de potasio o de sodio para elevar el pH, el uso de estos reguladores de pH también favorece el aporte de algunos elementos esenciales para la nutrición de las plantas (Gilsanz, 2007). El pH para cualquier condición debe ser mantenido entre 5.5 y 6.0 y la temperatura lo más cercana a 22 °C (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

#### **2.8.3.5 Conductividad eléctrica (CE)**

Existe una relación entre la concentración total de sales (nutrientes) y la conductividad eléctrica de la SN. La conductividad eléctrica apropiada para la producción de tomate está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura y luz) (Lara, 1999).

Para la producción comercial de tomate, Lara (1999) sugiere un valor óptimo de 2 dS m<sup>-1</sup>. Al incrementar la conductividad eléctrica se puede presentar una reducción de la energía metabólica, debido a que las plantas destinan mayor energía para absorber agua y nutrientes lo que disminuye su desarrollo; por otra parte, una conductividad eléctrica menor a 2 dS m<sup>-1</sup> puede ser limitante para el cultivo de tomate (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

#### **2.8.3.6 Temperatura de la solución nutritiva**

La temperatura de la SN influye en la absorción de agua y nutrientes (Baca-Castillo *et al.*, 2016). La temperatura óptima para la mayoría de las variedades de tomate es de aproximadamente 22 °C, en la medida que la temperatura disminuye también disminuye la absorción y asimilación de los nutrientes. El control de la temperatura de la SN es un factor que adquiere importancia secundaria en los lugares de clima templado. En las zonas o temporadas frías, es conveniente tener un sistema de calefacción para la SN (Bar-Yosef y Lieth, 2013).

### 2.8.3.7 Oxigenación

La oxigenación es fundamental en las plantas cultivadas, ya que interviene en el proceso de respiración que libera energía que la planta necesita para sus procesos fisiológicos (síntesis y transporte de compuestos), por esta razón la preparación y manejo adecuados de la SN son la base del éxito en la producción hidropónica de cultivos. Los síntomas más visibles de deficiencia de oxígeno en las plantas son clorosis general y marchitamiento, por ello es que el oxígeno disuelto debe estar presente en las raíces en la cantidad adecuada. Con excepción de los cultivos aeropónicos y los desarrollados en sustrato, los demás sistemas ofrecen muchas ventajas al estar las raíces de las plantas en contacto continuo con la SN, pero tienen la gran desventaja de que es necesario inyectar aire continuamente para mantener una concentración de oxígeno (O<sub>2</sub>) suficiente para la respiración de las raíces, debido a la baja capacidad amortiguadora de la SN (Pardossi *et al.*, 2011). La concentración de oxígeno más común en cultivos hidropónicos oscila entre 6 y 8 % (Clifford *et al.*, 2006), dicha concentración es importante para el desarrollo de raíz y crecimiento del cultivo, además de que muestra resultados favorables en el rendimiento del mismo, pero ésta depende en gran medida de la temperatura. Una concentración deficiente de oxígeno en la SN puede ocasionar efectos negativos en la respiración de las raíces y consecuentemente en el desarrollo de las plantas ya que esta situación reduce la permeabilidad de la raíz y limita la absorción de agua y nutrientes, también una baja concentración de oxígeno predispone a las plantas a podredumbres radicales causadas por hongos (Clifford *et al.*, 2006; Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2012).

### 2.8.3.8 Presión osmótica y potencial osmótico

Para explicar estos términos se puede partir de que una membrana semipermeable que divide a una solución de electrolitos de un solvente, permite el paso de las moléculas de este último pero no el paso de los iones de la solución de electrolitos; al cruzar estas moléculas del solvente la membrana semipermeable ejercen una presión y siguen moviéndose en ambas direcciones a través de la membrana, esta presión generada se conoce como presión osmótica. Por otra parte el potencial osmótico es equivalente a la presión osmótica en concepto pero de signo opuesto, es decir, la presión osmótica siempre se expresa como presión y el potencial osmótico como energía. Estos dos conceptos son muy importantes en la producción hidropónica debido a que deben ser tomados en cuenta para tener una relación mutua entre aniones combinada con una relación mutua entre

cationes y así determinar la mejor concentración absoluta de iones en la SN (Baca-Castillo *et al.*, 2016).

#### **2.8.3.9 Sanidad**

Con respecto a la sanidad deberemos emplear el criterio de que «con la cocina limpia se cocina mejor», deberemos ser muy cuidadosos de la higiene y evitar todo tipo de contaminación ya que hay ciertos hongos y bacterias que en medios líquidos se desarrollan a gran velocidad. Se deberán desinfectar con hipoclorito u otros desinfectantes las bandejas de poliuretano a ser reutilizadas, los trozos de esponjas que actúan de sujetadores de las plantas en algunos sistemas hidropónicos deberán ser descartados sin posibilidad de uso por segunda vez. Los medios sólidos deben descartarse luego de su uso y en lo posible ser estériles o esterilizados al ser usados por primera vez. En caso de constatare contaminación se deberá descartar todo el cultivo e higienizar todo el sistema antes de comenzar nuevamente. Respecto a los tratamientos sanitarios de los cultivos, éstos se desarrollarán en forma similar a la de los cultivos convencionales, con las recomendaciones existentes para cada cultivo, evitando las aplicaciones innecesarias de productos químicos, respetando los tiempos de espera y utilizando aquellos productos de menor toxicidad (Gilsanz, 2007; Resh, 2012).

#### **2.8.3.10 Principales soluciones nutritivas utilizadas en hidroponía**

Existen una variedad de soluciones nutritivas a ser utilizadas algunas de las cuales se presentan en el Cuadro 1. En general se usan soluciones de aplicación general, que luego, a través de la experiencia y la práctica, se van especializando para un cultivo, para una etapa del cultivo y/o variedad.

**Cuadro 1. Concentración de nutrimentos en algunas de las principales soluciones nutritivas (ppm).**

Nutrimento	Hogland y Arnon	Hewit	FAO	Jensen	Larsen	Cooper	Steiner
N	210	168	150-225	106	172	200-236	167
P	31	41	30-45	62	41	60	31
K	234	156	300-500	156	300	300	277
Mg	34	36	40-50	48	48	50	48
Ca	160	160	150-300	93	180	170-185	183
S	64	48	---	64	158	68	112
Fe	2.5	2.8	---	3.8	3	12	2-4
Mn	0.5	0.54	0.5-1	0.81	1.3	2	0.62
B	0.5	0.54	0-0.4	0.46	1	0.3	0.44
Cu	0.02	0.064	0.1	0.05	0.3	0.1	0.02
Zn	0.05	0.065	0.1	0.09	0.3	0.1	0.11
Mo	0.01	0.04	0.05	0.03	0.07	0.2	---

(Carrasco, 1996)

#### 2.8.4 Enfermedades más comunes del tomate cultivado en hidroponía

En general son muchos los patógenos asociados al cultivo de tomate que pueden afectarlo en producción hidropónica. Dentro de las más importantes se pueden mencionar los que están relacionados con la SN, el sustrato y las raíces:

*Pythium* tiene una alta probabilidad de presencia y es frecuentemente severo en casi todo tipo de plantas producidas en sistemas hidropónicos. Materiales como sustratos, tuberías, tanques, goteros, etc., previamente utilizados para la producción de cultivos hidropónicos con frecuencia pueden albergar *Pythium*, son a menudo fuentes potenciales de enfermedades en cultivos sucesivos. La recirculación de la SN es el principal medio por el cual se dispersan los patógenos en cultivos hidropónicos (Hultberg *et al.*, 2010; Stewart-Wade, 2011).

La dispersión de los patógenos de la raíz es el principal riesgo en los sistemas hidropónicos, y en los sistemas cerrados es aún más riesgoso. Algunos patógenos que infectan la raíz pueden ser dispersados a través de la SN, por esta razón la adopción de sistemas hidropónicos con recirculación se ha visto frenada (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014b). Los

patógenos que causan más problemas de enfermedades en la raíz son *Fusarium oxisporum*, *Verticillium spp.*, *Pythium spp.* y *Phytophthora spp.*, siendo estos dos últimos de los más severos y más comunes en los sistemas hidropónicos con recirculación (Khalil y Alsanius, 2010; Stewart-Wade, 2011; Abdel-Monaim *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Carrillo y García, 2014).

La pudrición de la raíz causada por *Pythium aphanidermatum* es una de las enfermedades más importantes del jitomate cultivado sin suelo en invernadero (Khalil y Alsanius, 2010). El control de esta enfermedad es complicado debido a que el patógeno, especialmente las zoosporas, puede propagarse fácilmente en la SN de recirculación a todo el sistema de cultivo (Schwarz *et al.*, 2010; Stewart-Wade, 2011).

Dentro de las enfermedades causadas por organismos bacterianos más importantes en producción hidropónica se encuentra el cáncer bacteriano causado por *Clavibacter michiganensis* y el tomate es uno de los cultivos más atacados. Esta enfermedad se considera poco frecuente pero severa y en las condiciones adecuadas (25 – 28 °C) presenta marchitamiento marginal de los folíolos como primer síntoma, posteriormente provoca agrietamiento del tejido vegetal hasta necrosar y marchitar la planta. En hidroponía la bacteria se ve favorecida por la temperatura del invernadero y la humedad presente en estas condiciones de cultivo (Borboa *et al.*, 2009; Abbasi *et al.*, 2002).

Otras enfermedades que pueden presentarse en cultivos hidropónicos son: A.- Manchas foliares, producidas por distintas especies de hongos, entre otros *Alternaria*, *Cladosporium*, *Stemphylium*; para el control de estas patologías es fundamental utilizar semilla y plántulas sanas, eliminar restos de cosecha y favorecer la aireación. B.- Tizones foliares, como los causados por *Phytophthora infestans* (Tizon tardío) y *Alternaria solani* (Tizón temprano), para estos patógenos es importante mantener el follaje libre de agua, desinfectar las semillas y favorecer la aireación. C.- Botritis, moho gris o pudrición gris, que probablemente constituye el problema patológico más ampliamente distribuido, al afectar no sólo tomate, sino también otras especies hortícolas en cultivo hidropónico. D.- Peca y mancha bacteriana del tomate, producidas por las bacterias *Pseudomonas syringae pv. tomato* y *Xanthomonas campestris pv. vesicatoria*, respectivamente. Para estas enfermedades es fundamental favorecer la aireación, evitando la condensación de agua dentro del invernadero ya que las dos especies se diseminan por el salpicado de gotas de agua. E.- Virus, dentro de los más importantes destacan: V. Mosaico del tomate, V. Mosaico del tabaco, V. Mosaico leve o latente de la papa, V. Mosaico rugoso severo de la papa, V. Mosaico del pepino, V. Mosaico

de la alfalfa, V. Marchitez manchada del tomate y V. Mosaico del pepino dulce (Sandoval, 2004; Abbasi *et al.*, 2002; Sosa, 2013).

Otras enfermedades de importancia que pueden atacar al cultivo de tomate, causando daño en particular en el cuello de la planta principalmente por excesos de humedad y deficiencia de oxígeno son el damping off o secadera de plántulas (*Rhizoctonia solani*): es uno de los problemas iniciales en el cultivo, desde la preemergencia y la primera etapa de desarrollo de las plantas. Las plántulas se pueden marchitar rápidamente causando una drástica reducción de la población de plantas, la uniformidad, el desarrollo y el rendimiento del cultivo (Carrillo y García, 2014). La podredumbre húmeda del tallo (*Sclerotinia sclerotiorum* *Sclerotinia minor*), que causa una podredumbre blanda y húmeda sobre los tejidos del tallo a nivel del suelo. La zona afectada toma un color castaño claro y en condiciones de alta humedad la presencia de un micelio blanco algodonoso, y dentro del mismo aparecen esclerocios oscuros de tamaño y forma variable (Sosa, 2013). Marchitamiento vascular (*Verticillium dahliae*), esta enfermedad provoca que las plantas enfermas manifiesten un ligero marchitamiento del brote terminal, que se acentúa a las horas cálidas del día y al anochecer, finalmente la enfermedad evoluciona y el marchitamiento se hace permanente. Las hojas manifiestan clorosis y amarillamiento marginal e intervenal de los folíolos con una característica mancha en V cuya parte más ancha queda en el borde del folíolo; luego se necrosa tomando color pardo, pero siempre conservan halo amarillo (Sosa, 2013). Enfermedades bacterianas de importancia que también pueden atacar el tallo de la planta son la necrosis medular (*Pseudomonas corrugata* *Scarlett*), cuyos síntomas de la enfermedad son manchas pardas y difusas sobre tallos. Finalmente los tallos se agrietan y aparecen numerosas raíces adventicias muy cortas desde el interior. Internamente la médula toma un color pardo y de consistencia blanda, terminando por ahuecarse (Sosa, 2013); marchitez bacteriana de las solanáceas (*Ralstonia solanacearum*), que provoca una disminución en el crecimiento, presentando un amarillamiento leve y una marchitez repentina en hojas más jóvenes durante las horas más calurosas del día. Por la noche, con las temperaturas frescas las plantas enfermas recuperan su turgencia, hasta que llegan a la etapa de marchitez permanente, debido al taponamiento de los vasos conductores (xilema y floema) de nutrientes y agua. Bajo condiciones favorables para la enfermedad, las plantas se marchitan y mueren rápidamente (Carrillo y García, 2014); y la podredumbre blanda (*Erwinia carotovora subsp carotovora*), que causa sobre los tallos manchas alargadas, verde oscuras y húmedas. Se propaga muy rápido dentro de la planta, causando

marchitamiento y muerte de la planta. Sobre los frutos las manchas son hundidas, oscuras, acuosas. Causan la desintegración total del fruto, que se transforma en una masa líquida sostenida por la epidermis que finalmente se rompe y cae al suelo (Sosa, 2013).

#### **2.8.4.1 Manejo y prevención de enfermedades en cultivos hidropónicos**

En los cultivos hidropónicos es necesario aplicar medidas para prevenir y en caso de presencia de enfermedades para manejarlas de la mejor manera posible. Para ello debe aplicarse un manejo integrado de enfermedades principalmente mediante la adquisición de materiales como sustratos, contenedores, rafias, anillos, entre otros libres de fitopatógenos, o bien si son reutilizados de un ciclo previo, que estén previamente desinfectados. Por otra parte es muy importante tener un control minucioso de los riegos en el caso de sistemas con uso de sustrato. Mantener la SN en todo momento cubierta de la luz solar y protegida de contaminantes fisicoquímicos como el polvo, agua de lluvia u otros elementos que puedan inocularla con fitopatógenos, por lo que es de vital importancia tener un control en el tipo de agua utilizada (pozo, embalse, aguas recicladas) en los sistemas hidropónicos y en la manera de preparar las soluciones nutritivas. (Ehret *et al.*, 2001; Abbasi *et al.*, 2002; Khalil y Alsanius, 2010; Abdel-Monaim *et al.*, 2012).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Ubicación y condiciones ambientales en que se llevó a cabo la investigación

La investigación se llevó a cabo en una nave de invernadero con control pasivo de clima de 256 m<sup>2</sup> de superficie entre los meses de mayo a noviembre de 2015. El experimento fue establecido en la Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Las coordenadas geográficas de su ubicación son 22° 43' 42" de Latitud Norte y 102° 40' 58" de Longitud Oeste.

El experimento se llevó a cabo entre los meses de mayo a noviembre de 2016.

#### 3.2 Tratamientos y diseño experimental

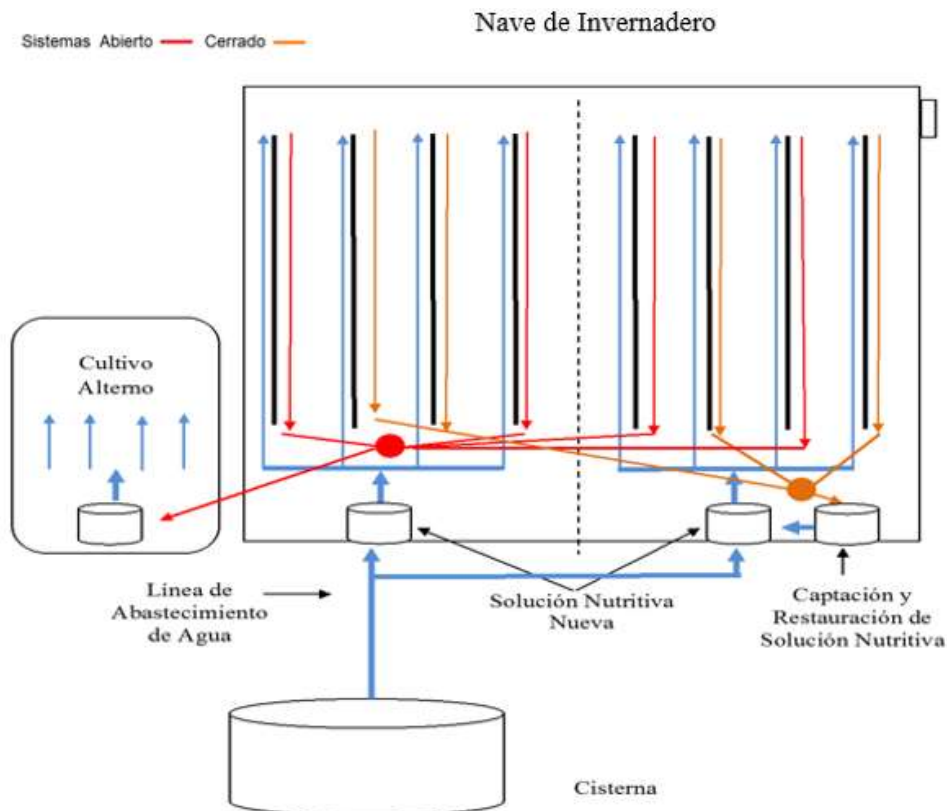
Se evaluaron dos tratamientos, los cuales consistieron en dos sistemas hidropónicos: uno cerrado (con recirculación de la SN) y otro abierto (sin recirculación de la SN).

La unidad experimental estuvo constituida por una cama de 16 m de longitud y 70 cm de ancho, la cual contuvo 65 macetas de polietileno con dos plantas cada una, teniéndose un total de 1040 plantas para una densidad de 4.0 plantas m<sup>-2</sup>. Cada tratamiento se llevó a cabo con cuatro repeticiones en un diseño experimental bloques al azar (Figura 1).

En el sistema cerrado, la SN drenada se filtró y se captó en un depósito de 200 L de capacidad, de ahí fue bombeada a un contenedor de 1000 L, donde se restauraron: la conductividad eléctrica (CE), el potencial de hidrógeno (pH) y las concentraciones de los macronutrientes que las plantas consumen en mayor cantidad (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y K<sup>+</sup>); posteriormente esta solución restaurada se inyectó nuevamente como solución nueva en el sistema de irrigación. Durante todo el ciclo sólo se eliminó la SN drenada en tres ocasiones, en la etapa de inicio de formación de los primeros frutos, en la etapa de plena producción y al final del ciclo.

En el sistema abierto, la SN drenada, también fue filtrada y captada en un contenedor de 200 L, de ahí se envió a otro de 700 L donde fue restaurada para posteriormente usarla en un cultivo alterno bajo condiciones de invernadero, evitándose su desperdicio y la contaminación del suelo en el sistema hidropónico donde fue drenada, disminuyéndose al mismo tiempo la pérdida económica del agua y fertilizantes utilizados.





**Figura 1. Establecimiento de sistemas hidropónicos abierto y cerrado en cultivo de tomate.**

En ambos sistemas, de la SN aplicada al sustrato, una parte se absorbió por las plantas y otra fracción drenó de las macetas y fue conducida por efecto de la gravedad hasta sus contenedores respectivos (ambos de 200 L) y de ahí, con ayuda de un flotador automatizado y una electrobomba, se transportó a los contenedores de restauración (de 1000 y 700 L) para su uso posterior (Figura 2).

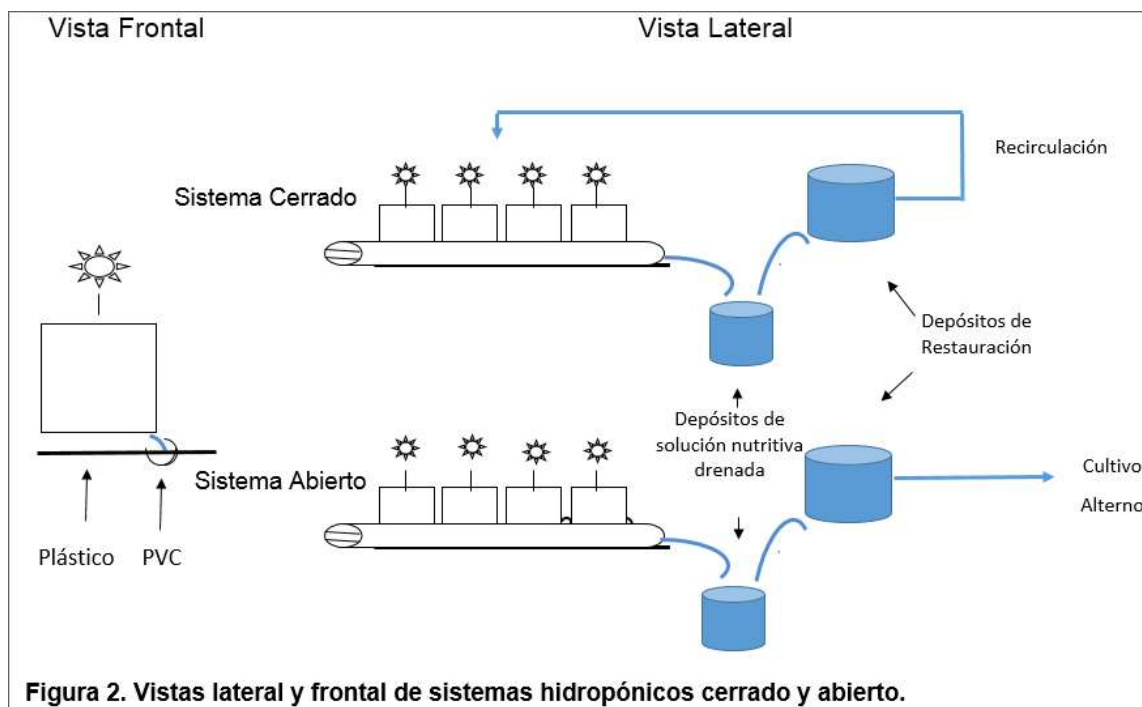


Figura 2. Vistas lateral y frontal de sistemas hidropónicos cerrado y abierto.

### 3.3 Material vegetal y sistema de producción

El material vegetal utilizado fue una variedad híbrida de hábito de crecimiento indeterminado, nombrada “El Cid”, del tipo saladette. Su trasplante se realizó al momento de haberse formado de 2 a 3 pares de hojas verdaderas en la plántula, aproximadamente a los 35 días después de la siembra. Las plántulas se trasplantaron en sustrato perlita de granulometría fina, contenido en macetas de polietileno de 25 L de capacidad, la perlita empleada se reutilizó en tres ciclos previos para la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), pepino (*Cucumis sativus* L.) y tomate nuevamente. El sustrato se desinfectó antes de ser utilizado en cada ciclo de cultivo con hipoclorito de sodio debido a su buen resultado como controlador de fitopatógenos (Poncet *et al.*, 2001; Cayanan *et al.*, 2009); para esto se aplicaron 20 ml de hipoclorito por cada 20 litros de agua, donde se dejó inmerso por dos horas, posteriormente se enjuagó con agua limpia y se colocó nuevamente en su maceta previamente desinfectada.

### 3.4 Manejo de la solución nutritiva durante el experimento

Durante el ciclo productivo se utilizó la SN Steiner en el 75 % de los primeros riegos (entre 28 y 32 riegos), la SN drenada de cada tratamiento se almacenó en su respectivo reservorio, antes de los últimos ocho riegos de cada día, la solución drenada del tratamiento con

recirculación se restableció añadiendo el agua necesaria para bajar la CE a  $1.7 \pm 0.1 \text{ dS m}^{-1}$  y posteriormente la cantidad necesaria de una solución 1 N de nitrato de potasio para lograr una CE de  $2.0 \pm 0.1 \text{ dS m}^{-1}$ ; y la cantidad necesaria (cuando se requirió) de una solución 1 N de ácido fosfórico para re-establecer el pH a  $5.5 \pm 0.1$ ; en ningún caso la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  fue superior a  $1.2 \text{ mol}_c \text{ m}^{-3}$ .

El agua utilizada para preparar la SN tuvo un  $\text{pH}=7.23$  y una  $\text{CE}=0.55 \text{ dS m}^{-1}$ . La concentración de iones solubles en  $\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$  fue:  $\text{NO}_3=0.21$ ,  $\text{P-PO}_4=0.02$ ,  $\text{SO}_4=0.70$ ,  $\text{HCO}_3=3.60$ ,  $\text{Cl}=0.80$ ,  $\text{Ca}=1.85$ ,  $\text{Mg}=1.48$ ,  $\text{K}=0.26$ ,  $\text{Na}=2.09$ ; y en  $\text{mg L}^{-1}$  de los micronutrientes:  $\text{Fe}=0.03$ ,  $\text{Mn}=0.02$ ,  $\text{Zn}=0.01$ ,  $\text{Cu}=0.00$  y  $\text{B}=0.10$ . Los fertilizantes utilizados fueron nitrato de calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 0.2\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), fosfato monopotásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Para proporcionar los micronutrientes se utilizó un fertilizante que contiene una concentración de: 6.6, 2.6, 1.1, 0.9, 0.3, y 0.2 %, de Fe, Mn, Zn, B, Cu y Mo, respectivamente, Fe, Mn, Zn y Cu en forma de quelato con EDTA; se aplicaron 30 g de este fertilizante por cada metro cúbico de SN. El agua utilizada fue directamente de pozo profundo, la presencia en ella de bacterias y hongos fue negativa.

### **3.5 Variables medidas en la planta**

Para las variables medidas en planta se seleccionó una planta de cada unidad experimental, es decir, una planta por cada cama de cultivo (cuatro por cada sistema hidropónico), en la cual se realizaron las mediciones a continuación mencionadas.

#### **3.5.1 Longitud de tallo (LT) y diámetro de tallo (DT)**

Se midieron con un flexómetro y un vernier, respectivamente, una vez por semana desde el trasplante hasta el despunte apical de plantas; la LT se tomó desde el nivel del sustrato hasta la parte apical de la planta; y el diámetro de tallo se tomó usando como referencia el punto marcado por la altura de la semana anterior.

#### **3.5.2 Rendimiento**

Se expresó en cantidad de kilogramos producidos de frutos por cada metro cuadrado; también se evaluaron tres componentes de rendimiento fundamentales que se mencionan a continuación:

### **3.5.3 Número de frutos por planta**

Se contó el número de frutos cosechados durante el ciclo que hayan llegado a su madurez fisiológica y al final se hizo un promedio de los frutos cosechados por planta.

### **3.5.4 Tamaño de frutos**

El tamaño de frutos se obtuvo al momento de cosecha con un vernier digital Mitutoyo™ modelo SC-6 midiendo los diámetros ecuatorial y polar del fruto en milímetros.

### **3.5.5 Peso de frutos**

Los frutos fueron pesados inmediatamente después de haber sido cosechados en una báscula digital EK-200i con precisión de 0.01 g.

La medición de estas últimas dos variables (tamaño y peso) permitió categorizar los frutos ya que fue posible clasificarlos con la siguiente escala: 1ra (>130 g), 2da (100-130 g), 3ra (60-100 g) y 4ta (<60 g).

## **3.6 Variables medidas en la calidad de fruto**

Para evaluar la calidad se tomaron muestras de frutos con el mismo índice de madurez (color) en dos etapas de la producción, una en los frutos del tercer racimo y la segunda en los frutos del séptimo racimo, se cosecharon frutos con tres índices de madurez distintos (25 % rojo, 50 % rojo, y totalmente rojo), la evaluación se llevó a cabo en cada unidad experimental, las muestras estuvieron constituidas por cinco frutos considerando la misma posición de los frutos en el racimo. Los frutos se trituraron y molieron en un extractor de jugo marca Krups 267. El jugo fue exprimido en una fibra de malla 80 y se utilizó para determinar:

### 3.6.1 Conductividad eléctrica de fruto

Esta variable de calidad se midió en el jugo del fruto con una muestra de 50 mL, de acuerdo con lo recomendado por San Martín-Hernández *et al.* (2012), se obtuvo con un conductivímetro marca Hanna HI98130. La determinación se reportó en deci-Siem m<sup>-1</sup>.

### 3.6.2 pH de jugo

El grado de acidez en el jugo del fruto se midió en una muestra de 50 mL de jugo, de acuerdo con lo recomendado por Pérez-Rivas *et al.* (2012), medido con el potenciómetro marca Hanna HI98130.

### 3.6.3 Acidez titulable (AT %)

La acidez titulable se determinó mediante el método usado por Navarro-López *et al.* (2012) y Bugarín-Montoya *et al.* (2002). La acidez titulable (AT %) se expresó como porcentaje de ácido cítrico y se determinó con la siguiente fórmula:

$$AT(\%) = \frac{V NaOH(ml) \times NNaOH \left(\frac{meq}{ml}\right) \times Meq \text{ de ácido cítrico } \left(0.064 \frac{g}{meq}\right)}{V \text{ Jugo } (ml)} \times 100$$

*VNaOH*.- Volumen de Hidróxido de Sodio gastado en titulación.

*NNaOH*.- Normalidad del Hidróxido de Sodio.

*Meq de ácido cítrico (0.064 g/meq)*.- Peso atómico del ácido cítrico.

*V jugo*.- Volumen de jugo utilizado.

*x100*.- Multiplicado por cien para obtener porcentaje.

A mayor magnitud de la AT mayor calidad del fruto, debido a que tiene mayor contenido de ácidos orgánicos, entre ellos el ácido cítrico.

### 3.6.4 Sólidos solubles totales (SST) en grados Brix

Para esta determinación se tomó una muestra (una gota) obtenida del jugo del fruto, la cual fue depositada sobre el sensor del refractómetro marca ATAGO, modelo N-1E, con rango de lectura de 0 a 32 °Brix.

### 3.6.5 Índice de madurez

El índice de madurez (IM) se calculó con el método usado por De Bruyn *et al.* (1971) y San Martín-Hernández *et al.* (2012), obteniendo la relación entre SST y AT (%). La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$IM = \frac{SST}{AT(\%)}$$

### 3.6.6 Porcentaje de pérdida de peso

Para esta prueba, desde el primer corte se seleccionó una muestra de cinco frutos por unidad experimental, se pesaron en una balanza digital EK-200i con precisión de 0.01 g, este dato fue comparado con los datos obtenidos en mediciones posteriores de los mismos frutos; los cuales se mantuvieron en un lugar seco, fresco (23° C y 30 % de humedad relativa), a la sombra y sin circulación de aire.

## 3.7 Variables medidas en la solución nutritiva

### 3.7.1 Conductividad eléctrica (CE) y potencial de hidrógeno (pH)

Estos dos parámetros fueron medidos con un medidor combo de conductividad y pH marca Hanna, modelo HI98130, de los contenedores de SN se obtuvieron muestras de aproximadamente 50 mL para introducir el sensor del medidor y así obtener el dato. Estos parámetros se midieron tanto en la SN aplicada como en la drenada para regular la nutrición del cultivo y tener un desarrollo normal y equilibrado.

Para restaurar el pH, se utilizó ácido sulfúrico, la cantidad que se aplicó fue la requerida para disminuir nuevamente el pH a 5.5.

### **3.7.2 Volumen de solución aplicada**

Para verificar que este volumen fuera el requerido por la planta. Se instaló un par de goteros en cada unidad experimental, aproximadamente a la mitad de lo largo de las camas, estos goteros estuvieron dentro de un contenedor de 8.5 L para captar la solución aplicada en un día, al término del día se midió con una probeta graduada, obteniéndose el volumen en mililitros aplicados por día por planta.

### **3.7.3 Volumen de solución drenada**

La solución nutritiva drenada de las macetas fue captada por una canaleta de pvc dispuesta por debajo de las macetas a lo largo de toda la cama, una vez colectada la SN fue conducida por gravedad hasta un contenedor (bandeja de drenaje) donde se midió el volumen drenado por día por unidad experimental, con la ayuda de una probeta graduada. Esta medida también fue un parámetro para controlar el riego (tiempo, frecuencia y número de riegos) y la restauración del pH y la CE de la SN.

### **3.7.4 Porcentaje de drenaje**

Este dato (%D) se obtuvo mediante la relación entre el volumen drenado y el volumen aplicado de la SN. Matemáticamente se obtuvo dividiendo el volumen drenado entre el volumen aplicado y luego multiplicándolo por 100 para obtener el dato en porcentaje (%), quedando la fórmula de la siguiente manera:

$$\%D = \frac{\text{Volumen Drenado}}{\text{Volumen Aplicado}} \times 100$$

### **3.7.5 Cantidad de fertilizante.**

Los fertilizantes utilizados durante todo el ciclo de cultivo fueron contabilizados por el peso suministrado de cada uno de ellos para preparar la SN con las características requeridas. Estos pesos fueron registrados durante los ocho meses de duración del cultivo, para

determinar la cantidad de fertilizante aplicada y su productividad con respecto al rendimiento obtenido, así como también se determinó el costo del fertilizante que representa recircular la SN.

### **3.8 Análisis estadístico**

Los resultados obtenidos fueron analizados como un diseño experimental en bloques al azar, fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de medias mediante el criterio de Tukey, con 0.05 de nivel de significancia. Para lo cual se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System) versión 9.4.

### **3.9 Evaluación financiera**

Para el desarrollo del análisis financiero en esta investigación se utilizó como indicador la tasa interna de retorno (TIR) en cada sistema hidropónico, para esta determinación también se calculó el valor actual neto (VAN), el cual se transformó a valor presente el ingreso neto que se obtiene dentro de un periodo de 10 años. Para dichos indicadores se consideró la cuantificación de los costos de la inversión fija, costos de producción, así como los ingresos por la venta del tomate.



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 En la planta

#### 4.1.1 Longitud de tallo (LT) y diámetro de tallo (DT)

En la medición de estas variables en ambos tratamientos se obtuvieron datos muy semejantes (Cuadro 2), la longitud del tallo (LT) en el sistema hidropónico cerrado osciló entre 19 y 26 cm cada semana y entre 20 y 27 cm para el sistema abierto, ambos tratamientos tuvieron comportamientos dentro del parámetro considerado como normal (18-27 cm). El diámetro de tallo (DT) por otra parte, tuvo una media durante todo el ciclo de 13.97 mm para el sistema cerrado y 14.02 para el sistema abierto, mostrando ambos tratamientos una ligera tendencia a plantas vegetativas, ya que el parámetro de mayor equilibrio es de entre 11 y 12 mm (Muñoz, 2009); sin embargo, estos resultados obtenidos (13.97 y 14.02 mm) no presentaron un efecto negativo en la producción de la planta.

**Cuadro 2. Diámetro (DT) y Longitud de tallo (LT) promedios durante el ciclo de tomate para sistemas hidropónicos cerrado y abierto.**

Mes	Diámetro (mm)		Longitud (cm)	
	Sistema cerrado	Sistema abierto	Sistema cerrado	Sistema abierto
Mayo	6.74	6.8	33.41	33.99 <sup>†</sup>
Junio	13.7	14.19	125.31	129.51
Julio	16.79	16.19	219.61	225.54
Agosto	16.71	16.51	326.06	332.12
Septiembre	14.8	15.22	432.68	442.44
Octubre	14.76	14.59	531.39	542.49
Noviembre	14.31	14.65	649.24	658

<sup>†</sup>Cada dato representa la medida de cuatro mediciones por mes y cuatro repeticiones (n=16).

#### 4.1.2 Rendimiento

El rendimiento no fue diferente entre los sistemas hidropónicos abierto y cerrado (Cuadro 3); estos rendimientos son mayores en 12 % a los obtenidos por Sánchez-Del Castillo *et al.* (2014a); la presente investigación proporcionó resultados similares a los obtenidos por Oztekin *et al.* (2008) y Nakano *et al.* (2010) ya que no encontraron diferencias significativas

utilizando sustratos distintos y nuevos y diferentes sistemas hidropónicos abiertos y cerrados en el cultivo de tomate.

#### **4.1.3 Número de frutos**

El número de frutos por planta no fue diferente entre los sistemas hidropónicos abierto y cerrado (Cuadro 3). El número de frutos en ambos tratamientos osciló con mayor frecuencia entre 40-50 frutos por planta durante los 20 cortes realizados en todo el ciclo (mayo a noviembre); estos resultados son similares a los obtenidos por Urrieta-Velázquez *et al.* (2012) al usar una selección de tomate de costilla y un poco mayores a los obtenidos por Pérez-Rivas *et al.* (2012) en producción de tomate hidropónico con distintos materiales vegetales.

#### **4.1.4 Tamaño de frutos**

Para esta variable de rendimiento, sólo el diámetro ecuatorial de fruto fue diferente significativamente entre los tratamientos evaluados (Cuadro 3), el sistema abierto presentó el valor más alto; no hubo diferencia significativa para el diámetro polar de fruto; los resultados de ambos sistemas hidropónicos son similares a los de Ucan *et al.* (2005) en su categoría de fruto mediano en el cultivar "Daniela" (que produce en mayor cantidad frutos de aproximadamente 5-6 cm). 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 fotoasimilados destinados a cada fruto, propiciándose mayor tamaño de fruto (Ucan *et al.*, 2005; Pérez-Rivas *et al.*, 2012).

#### **4.1.5 Peso de frutos**

El peso de los frutos tampoco fue diferente entre ambos tratamientos (Cuadro 3), sin embargo, el sistema hidropónico abierto presentó un peso medio por fruto superior de 3.4 % respecto al sistema cerrado, lo cual puede deberse principalmente a que la SN del sistema abierto está en mayor equilibrio que la SN reutilizada en el sistema cerrado, la cual a medida que pasa más tiempo de recirculación, pierde más su equilibrio y concentración adecuados (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014b; Baca-Castillo *et al.*, 2016).

**Cuadro 3. Rendimiento de frutos de tomate en los sistemas hidropónicos cerrado y abierto en 20 cortes realizados en el ciclo de producción.**

Sistema hidropónico	Frutos por planta	Diámetros (mm)		Peso por fruto (g)	Rendimiento (kg m <sup>-2</sup> )	Categoría y Predominancia %	
		Polar	Ecuatorial				
Abierto	46.54a <sup>†</sup>	62.18a	49.97a	94.18a	17.5a	3	75-100
Cerrado	45.81a	61.95a	47.84b	92.48a	16.9a	3	75-100
<b>DMS<sup>‡</sup></b>	<b>2.24</b>	<b>2.10</b>	<b>1.67</b>	<b>21.60</b>	<b>3.94</b>		

<sup>†</sup> Medias seguidas con la misma letra dentro de columnas, no presentan diferencias significativas (Tukey, 0.05).

<sup>‡</sup> DMS= Diferencia Mínima Significativa.

Gracias a las variables mencionadas anteriormente (tamaño y peso de frutos) se determinó que los frutos que predominaron fueron de pesos de 60 a 100 g en ambos tratamientos (Cuadro 3) de acuerdo con la escala establecida para los tamaños (diámetros polar y ecuatorial) y pesos de los frutos.

## 4.2 En calidad de fruto

### 4.2.1 Conductividad eléctrica

En esta variable se encontraron valores que fueron desde 5.30 (sistema abierto) hasta 6.32 (sistema cerrado) (Cuadro 4), lo cual representa una diferencia del 5.95 % en esta variable. Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre los sistemas hidropónicos; tampoco hubo diferencias entre las etapas de muestreo de frutos, ni entre los índices de madurez de los frutos. Los resultados encontrados en esta variable en ambos tratamientos concuerdan con los observados por San Martín-Hernández *et al.* (2012) en un sistema hidropónico utilizando tezontle como sustrato, quienes encontraron que existe una relación directa entre la salinidad acumulada en un sustrato usado en hidroponía y la conductividad eléctrica del fruto.

#### 4.2.2 pH de jugo

El pH del jugo no tuvo diferencia significativa entre tratamientos por efecto de los sistemas hidropónicos, tampoco entre etapas de muestreo ni los índices de madurez de los frutos (Cuadro 4). El pH es un indicador de calidad, los mejores valores en tomates de calidad para esta variable están entre 4.0 y 5.0 (Aguayo y Artés, 2004) y los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con lo mencionado (Cuadro 3) y a los encontrados por Peña *et al.* (2013) en tomate hidropónico con cascarilla de arroz como sustrato; al tener el jugo de los frutos una menor acidez, se tiene mayor aceptación del fruto, ya que así resalta más su sabor dulce y agradable al consumirlo en fresco (Urrieta-Velázquez *et al.*, 2012).

#### 4.2.3 Acidez titulable (AT %)

En el análisis estadístico de esta variable los tratamientos no presentaron diferencia significativa por efecto de los sistemas hidropónicos, tampoco entre las etapas de muestreo, aunque se presentó un incremento en el porcentaje de acidez titulable de 14% entre el Índice 1 y el Índice 2, y de 39 % entre el Índice 1 y el Índice de madurez 3 (Cuadro 4). La tendencia en ambos tratamientos respecto a que, al aumentar el índice de madurez, disminuyó la AT también fue reportada por Bugarín-Montoya *et al.* (2002). Ambos tratamientos presentaron valores desde 0.15 hasta 0.32 % de acidez (Cuadro 4), similares a los obtenidos por Bugarín-Montoya *et al.* (2002) (0.19-0.32 %) con diferentes concentraciones de potasio en un sistema cerrado, y un poco menores a los encontrados por Pérez-Rivas *et al.* (2012) (0.25-0.43 %) utilizando distintos cultivares de producción. La acidez titulable en tomates hidropónicos frescos es muy variada puede presentar valores desde 0.19 a 0.45 % (Dobričević *et al.*, 2007) o incluso hasta 0.63 % (Arias *et al.*, 2000).

#### 4.2.4 Sólidos solubles totales (SST) en grados Brix

No hubo diferencia significativa entre los sistemas hidropónicos en ninguno de los índices evaluados en dos etapas, ni en ninguno de los índices de madurez (Cuadro 4), los resultados obtenidos variaron desde 4.85 hasta 6 °Brix, estos valores son superiores a los encontrados por Pérez-Rivas *et al.* (2012) de 4.57 a 5.10 °Brix en distintos cultivares y Urrieta-Velázquez *et al.* (2012) de 4.81 a 5.33 °Brix usando variedades nativas como material vegetal. Los SST (°Brix) son un parámetro de calidad del fruto que varía con la conductividad eléctrica de la SN y el estrés hídrico del fruto durante su desarrollo (Céspedes

*et al.*, 2004); en frutos de tomate de plantas bajo este tipo de estrés se almacenan principalmente iones y moléculas orgánicas (incremento en la concentración de fructosa y glucosa) (Munns, 2002).

**Cuadro 4. Efecto de sistemas hidropónicos abierto y cerrado en calidad de fruto de tomate.**

Etapa	Índice	Sistema Hidropónico	CE	pH	AT	SST	IM
1	1	Abierto	5.30	4.69	0.27	5.45	20.59
		Cerrado	5.66	4.67	0.32	4.98	16.22
1	2	Abierto	5.70	4.56	0.18	5.4	29.75
		Cerrado	5.68	4.59	0.22	4.9	22.76
1	3	Abierto	5.57	4.52	0.15	4.85	33.35
		Cerrado	5.83	4.46	0.18	5.05	28.95
2	1	Abierto	5.61	4.55	0.27	5.43	20.81
		Cerrado	6.32	4.59	0.19	5.40	29.22
2	2	Abierto	5.68	3.51	0.27	5.60	21.34
		Cerrado	5.95	3.61	0.25	6.00	24.04
2	3	Abierto	5.84	4.37	0.16	5.35	34.64
		Cerrado	5.95	4.62	0.17	5.15	33.43
<b>DMS</b>			<b>0.25</b>	<b>0.17</b>	<b>0.02</b>	<b>0.30</b>	<b>4.24</b>

SST= Sólidos Solubles Totales; pH= Potencial de Hidrogeno; CE= Conductividad Eléctrica; AT= Acidez Titulable; IM= Índice de Madurez; DMS= Diferencia mínima significativa.

#### 4.2.5 Índice de madurez (IM)

Este parámetro se vio afectado directamente por la variable SST (debido a sus valores altos), sin embargo, no hubo diferencia significativa entre tratamientos, los valores obtenidos variaron entre 16.2 y 34.6 para IM (Cuadro 4) con una media de 26.7 y 25.7 (Sistemas abierto y cerrado respectivamente), el IM medio obtenidos en las etapas 1, 2 y 3 fue de 21.71, 24.47 y 32.59, es decir, al aumentar el índice de madurez en los frutos muestreados se observó mayor IM, el incremento fue de 13 y 50 % al pasar del Índice 1 al 2 y del Índice 1 al 3, respectivamente. Estos índices de madurez obtenidos son mayores a los observados por Pérez-Rivas *et al.* (2012) (13.59 a 18.28) usando cuatro cultivares distintos y Bugarín-Montoya *et al.* (2002) (12.98 a 19.79) con distintas concentraciones y proporciones en la SN. Con valores obtenidos en un intervalo de 12 a 18 el índice de

madurez es el indicado para muchas variedades de tomate (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002). Si la relación es mayor a 10 los frutos son considerados de buena calidad (Kader *et al.*, 1978).

#### 4.2.6 Porcentaje de pérdida de peso

Los resultados del análisis de varianza para el porcentaje de pérdida de peso no presentaron diferencia significativa entre tratamientos, ambos sistemas hidropónicos mostraron una mayor pérdida de peso en la primera semana de medición (1 semana después de la cosecha SDC) (Cuadro 5); sin embargo, el porcentaje de pérdida de peso del fruto no debe de exceder el 7 % de su peso original para su comercialización (Navarro-López *et al.*, 2012) y los resultados de esta investigación concuerdan con lo mencionado.

**Cuadro 5. Pérdida promedio de peso en frutos por semana, en porcentaje, producidos en sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

<b>Sistema Hidropónico</b>	<b>1 SDC</b>	<b>2 SDC</b>	<b>3 SDC</b>	<b>PPPS</b>
Abierto	2.842a	1.906a	1.883a	2.210
Cerrado	2.810a	1.912a	1.916a	2.212
<b>DMS</b>	<b>0.427</b>	<b>0.283</b>	<b>0.321</b>	

SDC= Semanas después de la cosecha; PPPS= Pérdida promedio por semana; DMS= Diferencia mínima significativa

#### 4.3 En solución nutritiva

Cabe resaltar que estas variables en SN sólo fueron medidas con el fin de verificar una adecuada nutrición vegetal y correcta aplicación de la misma, para así tener un equilibrio en el desarrollo de las plantas.

##### 4.3.1 Conductividad eléctrica (CE) y potencial de hidrógeno (pH)

La CE de la SN se mantuvo entre 1.6 y 2.6 dS m<sup>-1</sup> y el pH entre 5.5 y 6.0 (Cuadro 6), de acuerdo con la etapa del cultivo según lo recomiendan Weerakkody *et al.* (2011), Putra & Yuliando (2015) y Baca-Castillo *et al.* (2016). El pH en la SN drenada osciló entre 6.4 y 7.1,

lo cual está en función de la relación amonio / nitrato, en la medida que aumenta esta relación el pH tiende a disminuir (Imas *et al.*, 1997; Hinsinger *et al.*, 2003; Savvas *et al.*, 2006; Baca-Castillo *et al.*, 2016). La CE de la SN drenada se incrementó (Cuadro 6), con una media durante el ciclo de 4.03 dS m<sup>-1</sup>, esto se debe a que la planta absorbe proporcionalmente más agua que nutrientes, si también se toma en cuenta la cantidad de agua que la planta absorbe y transpira y la que se pierde por evaporación, la solución drenada tendrá una concentración de soluto (nutrientes) mayor que de agua (solvente), aumentando así la conductividad eléctrica (Dorais *et al.*, 2001; Yescas-Coronado *et al.*, 2011).

**Cuadro 6. Conductividad eléctrica, pH, volumen de SN aplicado y drenado y porcentaje de drenaje en sistemas hidropónicos abierto y cerrado con cultivo de tomate.**

Mes	SN aplicada			SN drenada			PD
	CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH	VOL A (mL planta <sup>-1</sup> )	CE (dS m <sup>-1</sup> )	pH	VOL D (L canal <sup>-1</sup> ) <sup>†</sup>	
Mayo	1.64	5.59	432.84	2.79	6.77	17.96	31.91
Junio	1.76	6.2	873.16	3.49	6.47	40.21	35.42
Julio	1.83	6.5	1170.66	3.05	6.42	49.53	32.54
Agosto	2.22	5.5	1354.54	3.96	6.82	44.95	25.52
Septiembre	2.45	5.52	1476.81	4.87	6.91	56.43	29.39
Octubre	2.61	5.53	1503.81	5.05	7.03	54.94	28.10
Noviembre	2.56	5.5	1587.23	5.03	7.14	53.98	26.16

<sup>†</sup> 65 macetas con 130 plantas por canal

SN=Solución nutritiva; CE=Conductividad eléctrica; VOL A=Volumen aplicado por planta; VOL D=Volumen drenado; PD= Porcentaje de solución drenada.

#### 4.3.2 Volumen de solución aplicada y drenada

El volumen aplicado se fue incrementando en ambos tratamientos a medida que el cultivo cambió de etapa fenológica, para así proporcionar la cantidad de agua y nutrientes requeridos por las plantas, hasta llegar así a la aplicación de 1.58 L por planta (Cuadro 6), que corresponde con un volumen diario por planta de tomate en etapa de producción, lo recomendado es de 1.50 L (Flores *et al.*, 2007; Suazo-López *et al.*, 2014) este valor tienen

correspondencia con lo obtenido en la presente investigación en la etapa de máxima demanda y depende de las condiciones ambientales y de manejo del sistema de producción (Gent y Short, 2012; Herrero *et al.*, 2014). A medida que las plantas tuvieron requerimientos mayores de agua, la cantidad drenada tendió a disminuir lo que implicó modificaciones en el calendario de riegos (tiempo y frecuencia de riegos principalmente), para así satisfacer la demanda de agua pero sin tener un drenaje que fuera superior a 35 %, como lo recomiendan Vázquez-Gómez *et al.* (2009), Sánchez-Del Castillo *et al.* (2014a) y Agung y Yuliando (2015).

#### **4.3.3 Porcentaje de drenaje**

El porcentaje de SN drenada (PD) varió de 25.52 a 35.47 % (Cuadro 6), en ambos sistemas, esta cantidad de SN se reutilizó en el sistema cerrado evitando su pérdida, sólo se eliminó la SN drenada en tres ocasiones, en la etapa de inicio de formación de los primeros frutos, en la etapa de plena producción y al final del ciclo, lo cual en conjunto representó sólo 0.31 % de la SN aplicada; a diferencia del sistema abierto en el cual sí se perdió la totalidad de la solución drenada. Lo cual implica que en el sistema cerrado se tuviera un ahorro de agua de 26.81 % y 28.9 % de fertilizantes.

#### **4.3.4 Cantidad de fertilizante**

La cantidad de fertilizantes en conjunto aplicada por día durante el ciclo de cultivo (mayo-noviembre) varió de entre 11.04 kg a 105.1 kg en los meses de menor y mayor consumo respectivamente. En total se aplicaron 893.97 kg de fertilizante entre ambos sistemas hidropónicos durante el ciclo de jitomate (Cuadro 7). Considerando que los fertilizantes usados tienen un contenido promedio de 40 % de nutrientes, las cantidades de éstos corresponden a 23.91 y 31.18 g de nutrientes por kg de frutos, para el sistema cerrado y abierto respectivamente; estas cantidades de nutrientes son semejantes a las reportadas por Ojodeagua *et al.* (2008) ya que en su investigación se requirieron 27.8 g de nutrientes (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, y Mg) por cada kilogramo de fruto producido. La cantidad de nutrientes absorbida por las plantas está afectada por varios factores como la concentración en la SN y relación entre iones, selectividad de las raíces, el clima y la etapa de desarrollo de la planta (López *et al.*, 2003; López *et al.*, 2011; Baca-Castillo *et al.*, 2016).



**Cuadro 7. Cantidad de solución nutritiva aplicada y drenada, porcentaje de SN drenada, cantidad de fertilizante aplicado y perdido en la solución drenada, productividad del agua y productividad de los fertilizantes para producir tomate en un sistema hidropónico cerrado y otro abierto, en invernadero. n = 4.**

<b>Sistema Hidropónico</b>	<b>SN-A (m<sup>3</sup> ciclo<sup>-1</sup>)</b>	<b>SN-D (m<sup>3</sup> ciclo<sup>-1</sup>)</b>	<b>PD</b>	<b>Fer-A (kg ciclo<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fer-D (kg ciclo<sup>-1</sup>)</b>	<b>Pro-Agua (kg m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Pro-Fer (g kg<sup>-1</sup>)</b>
Cerrado	210.7b <sup>†</sup>	0.9 b	0.31 b	375.01b	0.0024 b	29.31 a	59.79 b
Abierto	289.5a	78.5 a	27.12a	518.96a	145.75 a	23.10 b	77.96 a
<b>DMS</b>	<b>10.56</b>	<b>7.20</b>	<b>8.345</b>	<b>60.904</b>	<b>21.386</b>	<b>3.609</b>	<b>1.515</b>

<sup>†</sup> Cifras seguidas con diferente letra en cada columna son diferentes al 5% de probabilidad.

SN-A = Solución nutritiva aplicada; SN-D = Drenada; PD = Porcentaje de drenaje de la SN; Fer-A = Cantidad de fertilizante aplicado a la SN; Fer-D = Cantidad de fertilizante drenado en SN.

#### 4.3.5 Evaluación financiera

El sistema cerrado tuvo una TIR mayor a la del sistema abierto, ya que fueron de 10.28 % y 7.99 %, respectivamente, en un periodo de tiempo de 10 años (Cuadro 15A). Cabe mencionar que el análisis financiero realizado en la presente investigación está tipificado en investigación y no en el ámbito comercial, por esto los valores de las TIR obtenidas. Estos valores reflejan una mayor rentabilidad de 22.2 % del sistema cerrado respecto al sistema abierto, esto debido al ahorro que se tiene en agua y fertilizantes (28-30 %) reciclando la SN (Massa *et al.*, 2010; Pardossi *et al.*, 2011; Cuadrado-García *et al.*, 2014; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014a; Moreno-Pérez *et al.*, 2015). Por otra parte, es importante el efecto positivo que se tiene en el ambiente con el sistema hidropónico cerrado, ya que el reciclaje de la SN permite mantener el potencial productivo del suelo al no contaminarlo con los desechos de SN, a diferencia del sistema abierto que con el paso del tiempo provoca un decremento en el rendimiento por el aumento de la contaminación del suelo en cada ciclo.

## V. CONCLUSIONES

El rendimiento de tomate no fue diferente entre los sistemas hidropónicos con y sin recirculación de la solución nutritiva establecidos en invernadero.

Sólo hubo diferencia significativa para el diámetro ecuatorial de fruto, pero no para diámetro polar, número de frutos, peso por fruto, ni para pérdida de peso.

No hubo diferencia significativa en ninguna variable de calidad entre ambos sistemas hidropónicos en tres índices de madurez en dos etapas de la producción.

El uso de un sistema hidropónico con recirculación de la solución nutritiva (cerrado) es una alternativa comparable con el sistema abierto en rendimiento y calidad de frutos producidos, pero con una reducción de 26.81 % de agua y 28.09 % de fertilizantes. Lo cual representa un beneficio ecológico debido al uso más eficiente del agua para producir tomate y a la reducción de riesgo de contaminar el suelo y el agua con los fertilizantes no aprovechados.

Con el sistema hidropónico cerrado se tiene una tasa de rentabilidad de 22.2 % más respecto al sistema hidropónico abierto.

## VI. LITERATURA CITADA

- Abbasi, P. A., Soltani, N., Cuppels, D. A., & Lazarovits, G. (2002). Reduction of bacterial spot disease severity on tomato and pepper plants with foliar applications of ammonium lignosulfonate and potassium phosphate. *Plant Disease*, 86(11): 1232-1236.
- Abdel-Monaim, M. F., Abdel-Gaid, M. A., & Armanious, H. A. (2012). Effect of chemical inducers on root rot and wilt diseases, yield and quality of tomato. *International Journal Agricultural Science*, 64 (7): 211-220.
- Aguayo, E., & Artés, F. (2004). Elaboración del tomate mínimamente procesado en fresco. *Compendios de Horticultura*, 15: 95-102.
- Agung, P. & Yuliando, H. (2015). Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a Review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3: 283–288.
- Alarcón, V. A. (2006). Proyectos en cultivo sin suelo ¿Cómo empezar? In: Cultivos sin Suelo. V. A. Alarcón (ed.). Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura, S. L. Reus. España. p 11-21.
- Albornoz, F., Torres, A., Tapia, M. L., & Acevedo, E. (2007). Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con agua desalinizada y desborificada en el valle de Lluta. *Idesia (Arica)*, 25(2): 73-80.
- Al-Omran, A. M., Al-Harbi, A. R., Wahb-Allah, M. A., Nadeem, M., & Al-Eter, A. (2010). Impact of irrigation water quality, irrigation systems, irrigation rates and soil amendments on tomato production in sandy calcareous soil. *Turk Journal Agriculture*. 34: 59-73.
- Alviter P., D. y Granados, S. D. (2005). Construcción y manejo de invernaderos en la producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) para el valle del mezquital, Hidalgo. *Revista Chapingo serie zonas áridas* 5: 13-18.
- Arias, R., Lee, T. C., Specca, D., & Janes, H. (2000). Quality comparison of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) ripened on and off vine. *Journal of Food Science*, 65(3): 545-548.
- Armenta-Bojórquez, A. D., Baca-Castillo, G. A., Alcántar-González, G., Kohashi-Shibata, J., Valenzuela-Ureta, J. G., & Martínez-Garza, A. (2001). Relaciones de nitratos y potasio en fertirriego sobre la producción, calidad y absorción nutrimental de tomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 7(1): 61-75.

- Baca-Castillo, G.A.J., Rodríguez, C. E. y Quevedo, N. A. (2016). La solución nutritiva en hidroponía. 1 ed. México, México. p 197.
- Quintana-Baquero, R. A. , López, H. E. B., Herrera, J. G. Á., Hernández, J. F. C., & Pinzón, H. H. (2010). Efecto del número de racimos por planta sobre el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 4(2): 185-198.
- Bar-Yosef, B. & Lieth, J. H. (2013). Effects of oxygen concentration in solution and uptake rate by roots on cut roses yield, and nutrients and sugars content in leaves. *Scientia Horticulturae* 155: 49–55.
- Bautista, M. N., Morales, G. O. & Sánchez, A. H. (2006). Manejo de Plagas. In: N. Bautista M. y J. Alvarado L. (ed.). Producción de jitomate en invernadero. Primera edición. Estado de México, México. p 127-149.
- Blancard, D. (2011). Enfermedades del tomate. Mundi-Prensa Libros. pp. 681.
- Bonilla-Barrientos, O., Lobato-Ortiz, R., García-Zavala, J. J., Cruz-Izquierdo, S., Reyes-López, D., Hernández-Leal, E., & Hernández-Bautista, A. (2014). Diversidad agronómica y morfológica de tomates arriñonados y tipo pimiento de uso local en Puebla y Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(2): 129-139.
- Brouwer, D. J., Jones, E. S., & Clair, D. A. S. (2004). QTL analysis of quantitative resistance to *Phytophthora infestans* (late blight) in tomato and comparisons with potato. *Genome*, 47(3): 475-492.
- Bugarín-Montoya, R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P., García-Paredes, P. 2002. Demanda de potasio del tomate tipo saladette. *Terra* 20: 391-399.
- Calvo, F. J., Belda, J. E., & Giménez, A. (2010). Una nueva estrategia para el control biológico de mosca blanca y *Tuta absoluta* en tomate. *Phytoma España: La Revista Profesional de Sanidad Vegetal*, (216): 46-52.
- Carrasco S, G. Izquierdo, J. (1996). Manual técnico la empresa hidropónica de mediana escala: la técnica de la solución nutritiva recirculante ("NFT"). Editorial FAO-Regional Office and Universidad de Talca. ISBN: 956-7059-16-0. p. 60.
- Carrillo F, J.A. y García E, R.S. (2014). Manejo de las principales enfermedades del tomate bajo condiciones de cultivo protegido. Fundación produce Sinaloa, A.C. Curso de agricultura protegida. 1ra edición. Culiacán Sinaloa. p. 15-28.
- Carrillo, J. C., Jiménez, F., Ruiz, J., Díaz, G., Sánchez, P., Perales, C., & Arellanes, A. (2003). Evaluación de densidades de siembra en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero. *Agronomía Mesoamericana*, 14(1): 85-88.

- Cásseres, E. H. (1981). Normas mínimas de calidad de hortalizas. Publicación miscelánea, núm. 43. ed. Preliminar. México. 38 p.
- Castilla, P. N. (2007). Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. 2da edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 462p.
- Cepeda, S. M. (2009). El tomate rojo: cultivo y control parasitológico. 1ra ed. Trillas. Distrito Federal, México. 222 p.
- Céspedes, A. M. G., Sanjuán, M. D. C. S., & Gavilán, M. U. (2004). Producción y calidad en el cultivo de tomate cherry. In: Tratado de Cultivos sin Suelo. Urrestarazu-Gavilán, M. (ed.). Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. p 703-747.
- Chaves, N., & Wang, A. (2004). Combate del moho gris (*Botrytis cinerea*) de la fresa mediante *Gliocladium roseum*. *Agronomía Costarricense*, 28(2): 73-85.
- Clifford, S. J., Sopher, C. R., Owen-Going, T. N., Liu, W., Grodzinski, B., Hall, J. C., & Benchimol, R. L. (2006). Etiology and epidemiology of Pythium root rot in hydroponic crops: current knowledge and perspectives. *Summa Phytopathologica*, 32(4): 307-321.
- CNA (Comisión Nacional del Agua) (2011). Disponibilidad del agua subterránea. Gobierno Federal. SEMARNAT.CONAGUA. México: CNA.
- Costales-Menéndez, D., Martínez, L., & Núñez-Vázquez, M. (2007). Efecto del tratamiento de semillas con una mezcla de oligogalacturónidos sobre el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 28(1): 85-91.
- Cruz, B. L. (2007). Calidad de semilla de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) por efecto de potenciales osmóticos, calcio y podas bajo condiciones de invernadero. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Cruz-Carrillo, J., Jiménez, F., Ruiz, J., Díaz, G., Sánchez, P., Perales, C., & Arellanes, A. (2003). Evaluación de densidades de siembra de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero. *Agronomía Mesoamericana*, 14(1): 85-88.
- Cuadrado-García, L. N., López-Roa, E. N., Bojacá-Aldana, C. R., & Merchán, P. J. A. (2014). Influencia del nitrógeno en la producción del tomate (*Lycopersicum esculentum* L) sembrado en sustrato en Sutamarchán (Boyacá). *Revista Ciencia y Agricultura*, 11(1): 85-90.
- De Bruyn, J. W., Garretsen, F., and Kooistra, E. (1971). Variation in taste and chemical composition of the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Euphytica*, 20: 214-227.

- De la Rosa-Rodríguez, R. 2014. Fitopatógenos presentes en la solución nutritiva para el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en un sistema hidropónico cerrado. Tesis de Licenciatura. Zacatecas, Zacatecas México. 66 p.
- Díaz, E. R., Pérez, E. S., Macías, R. R., Eguiarte, D. R. G., & Munguía, S. M. (2013). Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra Latinoamericana*, 31(4): 275-284.
- Dobričević, N., Voća, S., Benko, B., & Pliestić, S. (2007). The quality of fresh tomato fruit produced by hydroponic. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72(4): 351-355.
- Durán, J.M., Retamal, N., Moratiel, & R. (2014). NGS: Un nuevo sistema de cultivo hidropónico. Departamento de producción vegetal: Fitotecnia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.sech.info/ACTAS/Acta%20n%C2%BA%2050.%20XI%20Jornadas%20del%20Grupo%20de%20Horticultura/Sesi%C3%B3n%20V/NGS,%20Un%20nuevo%20sistema%20de%20cultivo%20hidrop%C3%B3nico.pdf>. Fecha de consulta noviembre de 2016.
- Ehret D., Alsanius B., Wohanka W., Menzies J., Utkhede R. (2001). Disinfestation of recirculating nutrient solutions in greenhouse horticulture. *Agronomie, EDP Sciences*, 21(4): 323-339.
- Favela, C. E. Preciado, R. P. Benavidez, M. A. (2006). Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 145 p.
- Franco N, F. (2006). Nematodos fitopatógenos de mayor importancia. In: N. Bautista M. y J. Alvarado L. (ed.). Producción de jitomate en invernadero. Primera edición. Estado de México, México. p 207-231.
- Galindo-Pardo, F. V., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Trejo-Valencia, R., Segura-Castruita, M. Á. & Orozco-Vidal, J. A. (2014). Caracterización físico-química de sustratos orgánicos para producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo sistema protegido. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(7): 1219-1232.
- García M., M. C. Jaramillo N., J. Rodríguez., V. P. (2012). Poscosecha de tomate. In Javier Nieto (ed.). Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. 1ra edición. Bogotá, Colombia. pp: 427-466.
- Garza, A. M., y Molina, V. M. (2008). Manual para la producción de tomate en invernadero en suelo en el estado de Nuevo León. SAGARPA. 183 p. Disponible en: [http://www.nl.gob.mx/pics/pages/da\\_publicaciones\\_base/manual-invernaderos.pdf](http://www.nl.gob.mx/pics/pages/da_publicaciones_base/manual-invernaderos.pdf) [Consultado el 2 de Junio de 2016].

- Gent, M. P., & Short, M. R. (2012). Effect on yield and quality of a simple system to recycle nutrient solution to greenhouse tomato. *HortScience*, 47(11): 1641-1645.
- Gil V, I. Sánchez C. del F. y Miranda V, I. (2000). Producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero. serie de publicaciones Agribot. Chapingo, México. P.90. Folleto 2273.
- Gilsanz, J. C. (2007). Hidroponía. INIA. Disponible en: [http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad\\_509.pdf](http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_509.pdf) (Visitado el 28 de julio de 2016).
- Gómez-Hernández, T., & Sánchez-del-Castillo, F. (2003). Soluciones nutritivas diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Terra Latinoamericana*, 21(1): 57-63.
- González, A. A., Mateos, R. A., López, M., Hernández, M. L., González, C. A. (2013) Alternativas para el manejo de Damping off en plántulas de tomate *Lycopersicon esculentum* Mill (L, 1753) (Solanales: *Solanaceae*). *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 1:1-10.
- Guzmán-Plazola, R. A., Fajardo-Franco, M. L., García-Espinosa, R., & Cadena-Hinojosa, M. A. (2011). Desarrollo epidémico de la cenicilla y rendimiento de tres cultivares de tomate en la comarca lagunera, Coahuila, México. *Agrociencia*, 45(3): 363-378.
- Hultberg, M., Alsberg, T., Khalil, S., Alsanius, B. (2010). Suppression of disease in tomato infected by *Pythium ultimum* with a biosurfactant produced by *Pseudomonas koreensis*. *Biocontrol*, 55:435-444.
- it is. (2014). (Integrated Taxonomic Information System of North America). [http://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search\\_topic=TSN&search\\_value=30554](http://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_value=30554).
- Jaramillo N., J. E., Sánchez L., G. D. Rodríguez., V. P. Aguilar A., P. A. Zapata C., M. A. Guzmán A., M. (2012). Manejo agronómico. In: Javier Nieto (ed.). Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas. 1ra edición. Bogotá, Colombia. p. 485.
- Jaramillo, N., P. J., Rodríguez, V. P., & Zapata, M. (2006). El cultivo de tomate bajo invernadero (*Lycopersicon esculentum*, Mill). CORPOICA. Antioquia, Colombia. p 48.
- Jaramillo, N. J., Rodríguez, V.P., Guzmán A, M. & Zapata, M.A. (2007). Manual técnico buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. CORPOICA-MANA-FAO. Rio negro (Colombia). 340 p.
- Kader, A. A., L. Morris, M. Stevens y M. Albright-Holton. (1978). Composition and flavor quality of fresh market tomatoes as influenced by some postharvest handling procedures. *Journal American Society Horticultural Science*, 103(1): 6-11.

- Khalil, S. & Alsanius BW. (2010). Evaluation of biocontrol agents for managing root diseases on hydroponically grown tomato. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117: 214-219.
- Knapp, M., & Kashenge, S. S. (2003). Effects of different neem formulations on the twospotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch, on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *International Journal of Tropical Insect Science*, 23(01): 1-7.
- Lara H, A. (1999). Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra*, 17(3): 221-229.
- López A, P.P. Cano M, A. Rodríguez D, G.S. Torres F, N. Rodríguez R, S.M. Rodríguez R, R. (2011). Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. *Tecnociencia*, 5(2): 98-104.
- López, J., Santos-Perez, J., Lozano-Trejo, S., & Urrestarazu, M. (2003). Mineral nutrition and productivity of hydroponically grown tomatoes in relation to nutrient solution recycling In *International Symposium on Managing Greenhouse Crops in Saline Environment* 609 (pp. 219-223).
- López-Pérez, L., Cárdenas-Navarro, R., Lobit, P., Martínez-Castro, O., & Escalante-Linares, O. (2005). Selección de un sustrato para el crecimiento de fresa en hidroponía. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(2): 171-174.
- Lykas, C., Katsoulas, N., Giaglaras, P., & Kittas, C. (2006). Electrical conductivity and pH prediction in a recirculated nutrient solution of a greenhouse soilless rose crop. *Journal of Plant Nutrition*, 29(9): 1585-1599.
- Magaña-Lira, N., Peña-Lomelí, A., Sánchez-del Castillo, F., Rodríguez-Pérez, J. E., & Moreno-Pérez, E. D. C. (2013). Comportamiento productivo de híbridos F1 de tomate y sus poblaciones F2. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(4): 371-379.
- Maroto B, J.V. (1995). Horticultura herbácea especial. Quinta edición. Editorial Mundiprensa. Madrid, España. 611 p.
- Martínez, E., Altisent, J. M. D., & Gracia, L. M. N. (2000). Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía (I). *Vida Rural*, (101): 40-43.
- Martínez, S., & Garbi, M. (2015). Modificación artificial del ambiente: cultivos protegidos. In J. Beltrano, & D. O. Giménez (eds.), *Cultivo en Hidroponía*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. pp.140-166.
- Martínez-Corral, L., E. Martínez-Rubín de Celis, F.G., Flores-García, P., Preciado-Rangel, H., Zermeño-González, R.D. & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Programa de cómputo



- para el cálculo de soluciones nutritivas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2): 149-153.
- Martínez-Gutiérrez, G. A., Ortiz-Hernández, Y. D., & López-Pozos, R. (2012). Oxigenación de la solución nutritiva recirculante y su efecto en tomate y lechuga. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(SPE. 5), 49-52.
- Massa, D. L. Incrocci, R., Maggini, G., Carmassi, C. A., Campiotti, A. & Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless culture of greenhouse tomato. *Agricultural Water Manage*, 97: 971-980.
- Mata-Vázquez, H., Anguiano-Aguilar, R. A., Vázquez-García, E., Gazano-Izquierdo, J., González-Flores, D., Ramírez-Meraz, M., Padrón-Torrez, E., Basanta-Cornide, R. García-Delgado, M. A., & Cervantes-Martínez, J.E. (2010). Producción de tomate sistema hidropónico con solución nutritiva reciclable en sustrato de tezontle. *Ciencia UAT*, 3:50-54.
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez, M.C. 2001. Evaluation of a greenhouse crop transpiration model with cucumber under high radiation conditions. *Acta Horticulturae*, 559: 465-470.
- Mondragón S, L. (2007). Producción de jitomate en invernadero. In Benítez T, H. (ed.). Programa editorial compromiso gobierno que cumple. 2da edición. pp: 50.
- Montero, J.I. (2012). Desarrollo de estructuras para invernaderos. Cuadernos de estudios agroalimentarios. *CEA* p. 45-70.
- Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-Del Castillo, F., Gutiérrez-Tlaque, J., González-Molina, L., & Pineda-Pineda, J. (2015). Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21: 43-55.
- Morgan, L. (2003). Greenhouse vegetables hydroponic tomatoes. *The Growing Edge*, 15 (1): 78-86.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & Environment*, 25(2): 239-250.
- Muñoz R, J.J. 2009. Manejo del cultivo de tomate en invernadero. pp: 45-92. In Castellanos, J.Z (ed). Manual de producción de tomate en invernadero. 1ra edición. Celaya Guanajuato.
- Nakano, Y., Sasaki, H., Nakano, A., Suzuki, K., & Takaichi, M. (2010). Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79(1): 47-55.

- Navarro-López, E. R., Nieto-Ángel, R., Corrales-García, J., García-Mateos, M. D. R., & Ramírez-Arias, A. (2012). Calidad poscosecha en frutos de tomate hidropónico producidos con agua residual y de pozo. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 18(3): 263-277.
- Ojo de Agua, J.L. (2007). Estrés salino y comparación de dos sistemas de producción sobre el rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en invernadero. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de Mexico. 105 p.
- Ojodeagua, J.L., J.Z. Castellano, J.J. Muñoz, G. Alcantar, L. Tijerina, P. Vargas y S. Enríquez. (2008). Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(4): 367-374.
- Ordeñana, K. M. (2002). Mecanismos de defensa en las interacciones planta-patógeno. *Revista Manejo Integrado de Plagas. Costa Rica*, 63: 22-32.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Ocampo-Mendoza, J., Sandoval-Castro, E., Salcido-Ramos, B. A., & Manzo-Ramos, F. (2010). Efecto de diferentes sustratos en crecimiento y rendimiento de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill) bajo condiciones de invernadero. *Ra Ximhai*, 6(3): 339-346.
- Ortiz V, G. (2010). Porque y como escoger producir bajo el concepto de agricultura protegida. *Agrosanluis*, 1(1) 1-11. Disponible en: <http://www.sedarh.gob.mx/agrosanluis/A01N01ENE10/A01N01ENE10.pdf> (Revisado el 12 de mayo de 2016).
- Oztekin, G. B., Tüzel, Y., Tüzel, I. H., & Meric, K. M. (2008). Effects of EC levels of nutrient solution on tomato crop in open and closed systems. *Acta Hort.*, 801: 1243-1250.
- Padilla-Bernal, L.E., Lara-Herrera, A., Reyes-Rivas, E., & Perez-Veyna, O. (2012). Competitiveness, efficiency and environmental impact of protected agriculture in Zacatecas, Mexico. *International Food and Agribusiness Management Review*, 15: 49-64.
- Páez, A., Paz, V., & López, J. (2000). Crecimiento y respuestas fisiológicas de plantas de tomate cv. Río Grande en la época mayo-julio. Efecto del sombreado. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 17(2): 173-184.
- Pardossi A., Carmassi G., Diara C., Incrocci L., Maggini R., Massa D. (2011). Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture. University of Pisa. *Euphoros*. 63 p.
- Peña, M. Y., Casierra-Posada, F. Á. N. O. R., & Monsalve, O. I. (2013). Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en cascarilla de arroz mezclada con

- materiales minerales y orgánicos. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 7(2): 217-227.
- Pérez-Rivas, M. P., Albarracín, M., Moratinos, H., & Navas, F. Z. (2012). Rendimiento y calidad de fruto en cuatro cultivares de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo condiciones protegidas. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 29: 395-412.
- Pineda-Pineda, J., Sánchez del Castillo, F., Ramírez-Arias, A., Castillo-González, A. M., Valdés-Aguilar, L. A., & Moreno-Pérez, E. D. C. (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.
- Quezado-Duval, A. M., Gazzoto Filho, A., Leite Júnior, R. P., & Camargo, L. E. A. (2003). Sensibilidade a cobre, estreptomicina e oxitetraciclina em *Xanthomonas* spp. associadas à mancha-bacteriana do tomate para processamento industrial. *Horticultura Brasileira*, 21(4): 670-675.
- Quintero, M. F.; González, C. A.; Florez-Roncancio, V. J. (2006). Physical and hydraulic properties of four substrates used in the cut-flower industry in Colombia. *Acta Hort.* 718: 499-506.
- Raviv, M. and H. Lieth (2008). Significance of soilless culture in agriculture. In: *Soilless Culture Theory and Practice*. M. Raviv and H. Lieth (eds.). Ed. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. 608 p.
- Reséndiz, M., Aguilar, J., & Luévano, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15(29): 763-774.
- Resh, H. M. (2012). *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. Impresiones CRC. 7a edición. 513 p.
- Rosberg, A.K. (2014). *Dynamics of root microorganisms in closed hydroponic cropping systems*. Faculty of Landscape Architecture, Horticulture and Crop Production Science. Thesis doctoral. Acta Universitatis agriculturae Sueciae. 51 p.
- Rouphael, Y., Colla, G., Battistelli, A., Moscatello, S., Proietti, S., & Rea, E. (2004). Yield, water requirement, nutrient uptake and fruit quality of zucchini squash grown in soil and closed soilless culture. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(3): 423-430.
- San Martín-Hernández, S., Ordaz-Chaparro, V. M., Sánchez-García, P., Colinas-Leon, B., María, T., & Borges-Gómez, L. (2012). Calidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

- producido en hidroponía con diferentes granulometrías de tezontle. *Agrociencia*, 46(3): 243-254.
- Sánchez, E. I. G., Ávila, J. A., & Muñoz, R. B. (2011). La agricultura protegida en Tlaxcala, Méjico: La adopción de innovaciones y el nivel de equipamiento como factores para su categorización. *Teuken Bidikay*, 02: 193-212.
- Sánchez-Del Castillo, F., Moreno-Pérez, E. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E. & Osuna-Encino, T. (2014a). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* 48: 185-197.
- Sánchez-Del-Castillo, F., González-Molina, L., Moreno-Pérez, E. D. C., Pineda-Pineda, J., & Reyes-González, C. E. (2014b). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3): 261-269.
- Sandoval B, C.R. (2004). Manual técnico manejo integrado de enfermedades en cultivos hidropónicos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación (FAO). Universidad de Talca. p. 53.
- Santos, B., Obregón-Olivas, H. A., & Salamé-Donoso, T. P. (2010). Producción de hortalizas en ambientes protegidos: estructuras para la agricultura protegida. Tecolostote-nicaragua: departamento de horticultural sciences, UF/IFAS Extensión. Obtenido de <http://agronomicatecnoparque.blogspot.com/2010/04/tomate-sembrarcielo-abierto-o-en.html>.
- Sanz de Galeano J. Urribari, A. Sádaba S. Del Castillo J. (2003). Hidroponía en Navarra. Disponible en: [www.navarraagraria.com/n136/hidroppo.pdf](http://www.navarraagraria.com/n136/hidroppo.pdf) (Visitado en julio de 2016).
- Schwarz, D., Beuch, U., Bandte, M., Fakhro, A., Büttner, C., & Obermeier, C. (2010). Spread and interaction of Pepino mosaic virus (PepMV) and *Pythium aphanidermatum* in a closed nutrient solution recirculation system: effects on tomato growth and yield. *Plant Pathology*, 59(3): 443-452.
- Segura-Castruita, M. A., Ramírez-Seañez, A. R., García-Legaspi, G., Preciado-Rangel, P., García-Hernandez, J.L., Yescas-Coronado, P., Fortis-Hernández M., Orozco-Vidal, J.A., & Montemayor-Trejo, J.A. (2011). Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pomez con tres diferentes frecuencias de riego. *Revista Chapingo serie Horticultura*, 17(1): 25-31.
- Sengupta, A., & Banerjee, H. (2012). Soil-less culture in modern agriculture. *World Journal Science. Technology*, 2(7): 103-108.

- SIAP. (2016). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Boletín semanal del SIAP de la SAGARPA, 2. <http://www.siap.gob.mx>
- Siller, J.H. (2004). Recolección, empaque y manejo poscosecha de tomate. In: J.Z. Castellanos (ed.). Manual de producción Hortícola en invernadero. 2da edición. INTAGRI. México. pp: 345-362.
- Sosa, M.A. (2013). Guía para el reconocimiento de enfermedades en el cultivo de tomate. instituto nacional de tecnología agropecuaria (INTA). 1ra edición. Formosa, Argentina. p. 31.
- Stewart-Wade, S. M. (2011). Plant pathogens in recycled irrigation water in commercial plant nurseries and greenhouses: their detection and management. *Irrigation Science*, 29: 267-297.
- Stutte, G. W. (2006). Process and product: Recirculating hydroponics and bioactive compounds in a controlled environment. *HortScience*, 41(3): 526-530.
- Tüzell, I. H., Tunali, U., Tüzell, Y. & Oztekin, G. B (2009). Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae*, 807: 457-462.
- Ucan, C. I., Sánchez del Castillo, F., Contreras, M. E., Corona, S. 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., Salas, S., M. del C., Carolina, M. P. y Morales, T.E. (2006). Bioseguridad a través del agua de riego en la horticultura protegida. *Vida Rural*, 239: 56-58.
- Urrestarazu, M., García, C.D., Moreno, S. y Alvaro, J.E. (2007). Bioseguridad en la horticultura protegida a través de química verde. *Horticultura*, 203: 38-42.
- Urrieta-Velázquez, J. A., Rodríguez-Mendoza, M. D. L. N., Ramírez-Vallejo, P., Baca-Castillo, G. A., Ruiz-Posada, L. D. M., & Cueto-Wong, J. A. (2012). Variables de producción y calidad de tres selecciones de jitomate de costilla (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie horticultura*, 18(3): 371-381.
- Vallejo, C. F. A., & Estrada S, É. I. (2004). Producción de hortalizas de clima cálido. Univiversidad Nacional de Colombia. p. 345.
- Van Der Blom, J., Robledo, A., Torres, S., & Sánchez, J. A. (2010). Control biológico en horticultura en Almería: un cambio radical, pero racional y rentable. *Cuadernos de Estudios Agroalimentarios*, 1: 45-60.
- Vázquez-Gómez, V., Villalobos-Reyes, S., Castellanos, J. Z. (2009). Manejo del riego en sustratos. In: Castellanos JZ, editor. Manual de Producción de Tomate en Invernadero. Celaya, Guanajuato, México: Intagri. p. 157-186.

- Velasco H., E., Nieto A., R., Navarro L., E. R. (2012). Cultivo de tomate en hidroponía e invernadero. Judith Sandoval R. 1ra Reimpresión. BBa. Estado de México, México. 126 p.
- Yescas-Coronado, P., Segura-Castruita, M. A., Orozco-Vidal, J. A., Enríquez-Sánchez, M., Sánchez-Sandoval, J. L., Frías-Ramírez, J. E., & Preciado-Rangel, P. (2011). Uso de diferentes sustratos y frecuencias de riego para disminuir lixiviados en la producción de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29(4): 441-448.
- Zárate N., B. H. 2007. Producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) hidropónico con sustratos, bajo invernadero. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México. 140 p.

## VII. APÉNDICE

**Cuadro 1A. Número de frutos, diámetros polar y ecuatorial, peso y categorización de frutos en sistemas hidropónicos abierto y cerrado en cultivo de tomate.**

CORT E	TRATAMIENTOS	No. De Frutos	Tamaño de Frutos		Peso por fruto (g)	Categorías y porcentaje de predominancia			
			Diámetro Polar (mm)	Diámetro Ecuatorial (mm)		1	2	3	4
1	Abierto	62	64.51	47.01	87.96	0	25	75	0
	Cerrado	47	62.74	46.34	77.98	0	25	50	25
2	Abierto	62	67.79	51.37	105.03	0	75	25	0
	Cerrado	54	62.84	47.91	114.06	25	0	75	0
3	Abierto	56	69.65	52.86	133.95	25	50	25	0
	Cerrado	42	66.08	50.17	94.35	0	0	100	0
4	Abierto	33	61.69	47.89	88.11	0	25	75	0
	Cerrado	47	59.11	45.72	74.29	0	25	50	25
5	Abierto	45	56.98	45.82	75.70	0	0	75	25
	Cerrado	37	54.41	43.56	62.94	0	0	50	50
6	Abierto	40	58.20	49.20	89.59	0	50	25	25
	Cerrado	42	63.87	45.53	71.11	0	0	75	25
7	Abierto	41	53.68	52.99	107.29	0	75	25	0
	Cerrado	29	59.41	49.46	88.57	0	25	75	0
8	Abierto	43	63.96	54.79	110.54	0	75	25	0
	Cerrado	40	60.67	50.50	91.38	0	50	50	0
9	Abierto	42	67.57	48.13	123.62	25	75	0	0
	Cerrado	48	60.04	56.71	84.96	0	0	100	0
10	Abierto	36	63.94	54.45	114.98	25	50	25	0
	Cerrado	33	56.45	47.29	75.98	0	0	75	25
11	Abierto	49	58.38	48.50	80.88	0	0	100	0
	Cerrado	50	56.69	46.06	71.95	0	0	50	50
12	Abierto	41	57.92	49.33	81.82	0	25	75	0
	Cerrado	45	55.14	44.95	67.34	0	0	100	0
13	Abierto	43	60.40	48.29	79.12	0	0	100	0
	Cerrado	46	61.55	50.31	88.16	0	25	75	0
14	Abierto	57	56.31	44.65	65.59	0	0	100	0
	Cerrado	42	62.45	49.91	89.73	0	25	75	0

15	Abierto	51	58.57	45.72	68.45	0	0	75	25
	Cerrado	48	58.38	44.51	66.60	0	0	75	25
<b>MEDIA</b>	<b>Abierto</b>	<b>46.543</b>	<b>62.187</b>	<b>49.972</b>	<b>94.180</b>				
	<b>Cerrado</b>	<b>45.813</b>	<b>61.956</b>	<b>47.845</b>	<b>92.480</b>				
<b>DMS</b>		<b>2.240</b>	<b>2.107</b>	<b>1.674</b>	<b>21.605</b>				

**Cuadro 2A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para número de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	4	26.672667	6.668167	0.17	0.9515
Error	115	4413.571000	38.378878		
Total corregido	119	4440.243667			

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	NF Media
0.006007	13.41553	6.195069	46.17833

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRAT	1	15.98700000	15.98700000	0.42	0.5199
REP	3	10.68566667	3.56188889	0.09	0.9639

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	115
Error de cuadrado medio	38.37888
Valor crítico del rango estudentizado	2.80129
Diferencia significativa mínima	2.2404

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	46.543	60	1
A			
A	45.813	60	2

**Cuadro 3A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para diámetro polar de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	4	19.032090	4.758023	0.14	0.9670
Error	115	3905.583297	33.961594		
Total corregido	119	3924.615387			

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	DP Media
0.004849	9.388646	5.827658	62.07133

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRAT	1	1.60083000	1.60083000	0.05	0.8285
REP	3	17.43126000	5.81042000	0.17	0.9157

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	115
Error de cuadrado medio	33.96159
Valor crítico del rango estudentizado	2.80129
Diferencia significativa mínima	2.1075

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	62.187	60	1
A			
A	61.956	60	2



**Cuadro 4A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para diámetro ecuatorial de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	4	187.598810	46.899702	2.19	0.0748
Error	115	2466.298049	21.448070		
Total corregido	119	2653.896859			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	DE Media
0.070688	9.468666	4.630990	48.90858

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRAT	1	135.7026008	135.7026008	6.33	0.0133
REP	3	51.8962092	17.2987364	0.81	0.4927

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	115
Error de cuadrado medio	21.44807
Valor crítico del rango estudentizado	2.80129
Diferencia significativa mínima	1.6748

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	49.9720	60	1
B	47.8452	60	2

**Cuadro 5A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para peso de frutos, producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	4	13170.8699	3292.7175	0.92	0.4534
Error	115	41048.0967	3569.1139		
Total corregido	119	423618.9665			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	P Media
0.031091	64.01370	59.74206	93.32700

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRAT	1	86.93816	86.93816	0.02	0.8762
REP	3	13083.93171	4361.31057	1.22	0.3050

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	115
Error de cuadrado medio	3569.114
Valor crítico del rango estudentizado	2.80129
Diferencia significativa mínima	21.805

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	94.18	60	1
A			
A	92.48	60	2

**Cuadro 6A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para rendimiento en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	4	7.54437150	1.88609288	0.61	0.6830
Error	3	9.21308850	3.07102950		
Total corregido	7	16.75746000			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	REN Media
0.450210	10.18414	1.752435	17.20750

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
TRAT	1	0.74786450	0.74786450	0.24	0.6555
REP	3	6.79650700	2.26550233	0.74	0.5957

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	3
Error de cuadrado medio	3.071029
Valor crítico del rango estudentizado	4.50085
Diferencia significativa mínima	3.9435

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	17.513	4	1
A			
A	16.902	4	2

**Cuadro 7A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para sólidos solubles totales de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	7	3.17916667	0.45416667	1.67	0.1436
Error	40	10.86000000	0.27150000		
Total corregido	47	14.03916667			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	IR Media
0.226450	9.838992	0.521057	5.295833

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
MED	1	1.76333333	1.76333333	6.49	0.0148
IND	2	1.13166667	0.56583333	2.08	0.1377
TRAT	1	0.12000000	0.12000000	0.44	0.5100
REP	3	0.16416667	0.05472222	0.20	0.8947

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	40
Error de cuadrado medio	0.2715
Valor crítico del rango estudentizado	2.85816
Diferencia significativa mínima	0.304

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	5.3458	24	1
A			
A	5.2458	24	2

**Cuadro 8A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para potencial de hidrógeno de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	7	4.44551667	0.63507381	6.88	<.0001
Error	40	3.80400833	0.09510021		
Total corregido	47	8.24952500			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	PH Media
0.638882	7.018679	0.308383	4.393750

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
MED	1	1.65020833	1.65020833	17.35	0.0002
IND	2	2.71995000	1.35997500	14.30	<.0001
TRAT	1	0.03853333	0.03853333	0.41	0.5280
REP	3	0.03682500	0.01227500	0.13	0.9423

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	40
Error de cuadrado medio	0.0951
Valor crítico del rango estudentizado	2.85816
Diferencia significativa mínima	0.1799

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	4.42208	24	2
A			
A	4.36542	24	1

**Cuadro 9A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para conductividad eléctrica de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	7	1.36530625	0.19504375	1.01	0.4406
Error	40	7.74392500	0.19359813		
Total corregido	47	9.10923125			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	CE Media
0.149882	7.642998	0.439998	5.756875

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
MED	1	0.00016875	0.00016875	0.00	0.9786
IND	2	0.01046250	0.00523125	0.03	0.9734
TRAT	1	0.59830208	0.59830208	3.08	0.0889
REP	3	0.75837292	0.25279097	1.31	0.2859

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	40
Error de cuadrado medio	0.193598
Valor crítico del rango estudentizado	2.85816
Diferencia significativa mínima	0.2597

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	5.8683	24	1
A			
A	5.6454	24	2

**Cuadro 10A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para acidez titulable de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	7	0.07452708	0.01064673	4.62	0.0007
Error	40	0.09220417	0.00230510		
Total corregido	47	0.16673125			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	AT Media
0.446989	22.01100	0.048012	0.218125

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
MED	1	0.00001875	0.00001875	0.01	0.9286
IND	2	0.07085000	0.03542500	15.37	<.0001
TRAT	1	0.00035208	0.00035208	0.15	0.6980
REP	3	0.00330625	0.00110208	0.48	0.6993

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	40
Error de cuadrado medio	0.002305
Valor crítico del rango estudentizado	2.85816
Diferencia significativa mínima	0.028

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.				
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT	
A	0.22083	24	2	
A				
A	0.21542	24	1	

**Cuadro 11A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para índice de madurez de frutos producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	7	1314.177467	187.739638	3.54	0.0047
Error	40	2122.285287	53.057132		
Total corregido	47	3436.462754			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	IM Media
0.382422	27.73974	7.284033	26.25848

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
MED	1	46.746295	46.746295	0.88	0.3535
IND	2	1023.653310	511.826655	9.65	0.0004
TRAT	1	11.510105	11.510105	0.22	0.6439
REP	3	232.267757	77.422586	1.46	0.2401

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	40
Error de cuadrado medio	53.05713
Valor crítico del rango estudentizado	2.85816
Diferencia significativa mínima	4.2496

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.				
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT	
A	26.748	24	1	
A				
A	25.709	24	2	

**Cuadro 12A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos siete días después de la cosecha en tres índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	22	109.5782232	4.9808283	3.57	<.0001
Error	97	135.2556381	1.3943880		
Total corregido	119	244.8338613			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	F1 Media
0.447562	41.77532	1.180842	2.828650

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
IND	2	66.08615460	33.04307730	23.70	<.0001
TRAT	1	0.03136333	0.03136333	0.02	0.8811
REP	19	43.46070530	2.28740554	1.64	0.0614

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	97
Error de cuadrado medio	1.394388
Valor crítico del rango estudentizado	2.80882
Diferencia significativa mínima	0.4279

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.				
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT	
A	2.8428	60	1	
A				
A	2.8105	60	2	

**Cuadro 13A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos catorce días después de la cosecha en tres índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	22	48.5195903	2.2054359	3.61	<.0001
Error	97	59.3007223	0.6113477		
Total corregido	119	107.8203126			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	F2 Media
0.450004	40.94490	0.781887	1.909608

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
IND	2	28.33915122	14.16957561	23.18	<.0001
TRAT	1	0.00114701	0.00114701	0.00	0.9655
REP	19	20.17929209	1.06206800	1.74	0.0425

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	97
Error de cuadrado medio	0.611348
Valor crítico del rango estudentizado	2.80682
Diferencia significativa mínima	0.2833

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	1.9127	60	2
A			
A	1.9065	60	1

**Cuadro 14A. Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba Tukey para pérdida de peso de frutos veintiuno días después de la cosecha en tres índices de madurez producidos en dos sistemas hidropónicos abierto y cerrado.**

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	22	51.6612112	2.3482369	2.98	0.0001
Error	97	76.3172148	0.7867754		
Total corregido	119	127.9784260			

R-cuadrado	Coef Var	Raíz MSE	F3 Media
0.403671	46.68891	0.887004	1.899817

Fuente	DF	Anova SS	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
IND	2	28.62796907	14.31398453	18.19	<.0001
TRAT	1	0.03346680	0.03346680	0.04	0.8370
REP	19	22.99977530	1.21051449	1.54	0.0893

Note: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Grados de error de libertad	97
Error de cuadrado medio	0.786775
Valor crítico del rango estudentizado	2.80682
Diferencia significativa mínima	0.3214

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.			
Tukey Agrupamiento	Media	N	TRAT
A	1.9165	60	2
A			
A	1.8831	60	1

<b>Cuadro 15A. Tasa interna de retorno y valor actual neto para un periodo de 10 años en sistemas hidropónicos abierto y cerrado.</b>			
<b>Sistema Abierto</b>		<b>Sistema Cerrado</b>	
Tasa de interés nominal	0.1461	Tasa de interés nominal	0.1461
Tasa de interés real	0.11	Tasa de interés real	0.11
VAN real	110,256	VAN real	128,549
	-133,849		-131,995
	-23,593		-3,446
<b>TIR real</b>	<b>7.99%</b>	<b>TIR real</b>	<b>10.28%</b>
VAN real	110,256	VAN real	128,549
	-133,849		-131,995
	-23,593		-3,446
<b>TIR nominal</b>	<b>11.84%</b>	<b>TIR nominal</b>	<b>14.21%</b>