UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

COMPARACIÓN DE LA DINÁMICA NUTRIMENTAL EN JITOMATE DESPUNTADO A TRES RACIMOS ENTRE SISTEMAS HIDROPÓNICOS ABIERTOS Y CERRADOS.

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

APROBADA

Presenta:

JHUSUA DAVID REINA GARCÍA

Bajo la supervisión del Dr. Felipe Sánchez del Castillo

Chapingo, Estado México, noviembre del 2020

COMPARACIÓN DE LA DINÁMICA NUTRIMENTAL EN JITOMATE DESPUNTADO A TRES RACIMOS ENTRE SISTEMAS HIDROPÓNICOS ABIERTOS Y CERRADOS.

Tesis realizada por Jhusua David Reina Garcia bajo la supervisión del Comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA.

DIRECTOR: _____

Dr. Felipe Sánchez del Castillo.

ASESOR: _____

Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez.

ASESOR: _____

Dr. J. Jesús Magdaleno Villar

ASESOR: _____

Dr. Joel Pineda Pineda

DEDICATORIA

Dedico con gran afecto esta tesis a mis padres Diddier Reina Bonza y Gloria García Báquiro, ustedes han sido y serán mi motivación, además, son mi ejemplo a seguir, sus luchas por la vida me han hecho esforzarme para ser cada día una mejor persona, sus sacrificios serán reflejados en mi vida.

Además, quiero agradecer enormemente a mi hermana Laura Reina, y a Sergio Meneses por brindarme su apoyo en cada decisión que he tomado.

A mi abuela Lilia del Carmen Bonza, a mi tío Freddy Reina, a mi familia Reina García, Díaz Reina, Calderón Reina y García Báquiro, a Sergio David Parra y Camila Herrera su apoyo emocional, me ayudo a persistir en la lucha de mi enfermedad y con voluntad y energía logre superarlo.

A mis amigos Samir Portillo Mendoza, Marcos Portillo Vázquez, Teresa Portillo Mendoza, Nelly García, Lupita Bautista y esposo, Anallely Moreno y Noe Carrillo les agradezco su hospitalidad y recibimiento en México. Me hicieron sentir como parte de su familia.

Al Maestro José Cutberto Vázquez y a las auxiliares del laboratorio Ana Lilia Meraz y Yadira Pérez Reyes por su tiempo y dedicación en el análisis de las variables evaluadas.

A Don Ángel por ayudarme a montar el experimento y estar pendiente del mismo.

A las estudiantes Luisa Fernanda Ríos Navarrete y Herlinda Dariana Álvarez Espinosa de la Universidad Politécnica de Tlaxcala Región Poniente, quienes realizaron su estancia I y II en los invernaderos de posgrados y con su colaboración me ayudaron en la realización del experimento**.**

Con mención especial también dedico este trabajo a mis compañeros de curso, (Lucia, José, Eduardo, Octavio, Laura) cada uno aportó su tiempo y dedicación para que se llevara a cabo esta investigación, gracias a ellos viví gratos momentos y aprendí demasiado, su sabiduría y enfoque me hicieron abrir mi mente a múltiples experiencias.

También quiero resaltar la labor de 11 personas especiales, que, con su ayuda, definitivamente logre cumplir mi meta y además estoy seguro que puedo confiar en cada uno de ellas, con cariño y admiración a Francisca Mejía, Nora Virginia Useche Carrillo, Juana Pérez, Arelys Marín Norato, Nancy Elena González, Alma Aurora Deanda, Ana Elizabeth Paredes, Jessica Díaz Reina, Ángela Mogollón y a mis amigos Cesar Augusto Barrera y Rommel Alvarado.

Para todos ustedes, le agradezco con todo el corazón, sin su ayuda este logro no se hubiese podido realizar ¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

Por su trabajo y empeño, esta tesis se logró gracias al acompañamiento y seguimiento de múltiples personas e instituciones. Que por su saber, financiamiento y apoyo me ayudaron a orientar.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el apoyo económico brindado durante mi estancia en México y estudios de Maestría.

Al Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de seguir con mis estudios de posgrado en sus instalaciones y además por facilitármelas para realizar mi experimento.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por su liderazgo y acompañamiento durante la maestría, sus conocimientos y experiencias, permitieron el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, por sus sugerencias, observaciones y recomendaciones, para el escrito de la tesis, sin duda mejoraron esta investigación.

Al Dr. Jesús Magdaleno Villar por su tiempo y estar pendiente del experimento, además de compartir su experiencia para el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Juan Martínez Solís, por su orientación y acompañamiento en todo el proceso de postulación y registro en la maestría y su preocupación por mi estado de salud.

Al Dr. Joel Pineda Pineda, por su asesoramiento y disposición a favor del presente.
proyecto.

Al Dr. Efraín Contreras Magaña, porque siempre demostró disposición por ayudarme en la ejecución del experimento, excelente ser humano y docente.

Igualmente quiero agradecer el apoyo recibido de mis profesores, colegas y amigos, durante mis estudios de Maestría, por los buenos tiempos.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombres y apellidos:	Jhusua David Reina García
Fecha de nacimiento:	11 de julio de 1996
Lugar de nacimiento:	Villavicencio-Meta / Colombia
CURP:	REGJ960711HNENRH08
Profesión:	Ingeniero Agrónomo

Desarrollo académico

Bachillerato:	Colegio Básico Manuela Beltrán
Licenciatura:	Universidad de los Llanos
Posgrado:	Maestría en Ciencias en Horticultura

RESUMEN GENERAL

Comparación de la dinámica nutrimental en jitomate despuntado a tres racimos entre sistemas hidropónicos abiertos y cerrados.

La producción intensiva bajo invernadero e hidroponía frecuentemente ocasiona la compactación y acumulación de sales en el suelo generando desequilibrios nutricionales que afectan el crecimiento y rendimiento de las plantas, así como la calidad de los productos cosechados. Por ello, se estudió la dinámica nutrimental en el cultivo de jitomate cultivado en ciclos cortos de 100 días de trasplante a fin de cosecha, y sembrado a una densidad de ocho plantas·m^{-2} en diferentes sistemas hidropónicos con y sin recirculación de solución nutritiva combinados con y sin acolchado plástico, además de un sistema de hidroponía profunda. Se empleó un diseño en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones y se realizó un análisis de varianza y pruebas de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$). Se analizaron por planta el peso seco, caracteres morfológicos, de rendimiento, ahorro en el gasto de agua y nutrientes: N, P, K, Ca y Mg. Respecto a los caracteres morfológicos y de rendimiento, el sistema de hidroponía profunda generó plantas de menor altura y de mayor rendimiento (2658 g), así como el mayor peso seco de hoja; mientras que el sistema sin recirculación de la solución nutritiva con acolchado generó el mayor peso seco de tallo y total por planta. El sistema con recirculación de la solución con acolchado y el de hidroponía profunda presentaron, respecto al sistema hidropónico sin recirculación y sin acolchado (testigo) ahorros de nutrientes entre 30 y 48%, un ahorro de agua entre 28 y 21% y una eficiencia de 25 y 23 litros de agua, asimismo para producir 1 kg de fruto se requirieron 5 y 3.6 g de N, 1 y 0.7 g de P, 6.4 y 4.7 g de K, 6.2 y 2.8 g de Ca y 1 y 0.5 g, respectivamente.

Palabras clave: Despunte temprano, cultivo sin suelo, hidroponía profunda, solución nutritiva, índices de eficiencia.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Jhusua David Reina García
Director de Tesis: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ABSTRACT

Comparison of the nutrimental dynamics in tomato plants pruned at three bunches in open and closed hydroponic systems

Intensive horticultural production under greenhouse and hydroponics conditions often causes compaction and accumulation of salts in the soil, generating nutritional imbalances that affect plant growth and yield, as well as the quality of the harvested products. For this reason, the nutrimental dynamics of tomato crop cultivated in short cycles of 100 days from transplanting to harvesting and planted at a density of eight plants·m^{-2} in different hydroponic systems with and without recirculation of nutrient solution combined with and without plastic mulch, as well as a deep hydroponic system, were studied. A completely randomized block design with four replicates was used and an analysis of variance and mean comparison test was performed (Tukey, $p \leq 0.05$). Dry weight, morphological and yield characteristics, water and nutrient expenditure savings per plant: N, P, K, Ca, and Mg were analyzed. Concerning the morphological and yield characteristics, the deep hydroponic system generated plants of lower height and higher yield (2658 g), as well as the highest leaf dry weight; while the system without recirculation of the nutrient solution with plastic mulch generated the highest stem and total dry weight per plant. The system with recirculation of the solution with plastic mulch and that of deep hydroponics presented in relation to the hydroponic system without recirculation and without plastic mulch (control) nutrient savings between 30 and 48%, water-saving between 28 and 21% and an efficiency of 25 and 23 liters of water, also to produce 1 kg of fruit 5 and 3.6 g of N, 1 and 0.7 g of P, 6.4 and 4.7 g of K, 6.2 and 2.8 g of Ca, and 1 and 0.5 g of Mg, were required respectively.

Keywords: early pruning, hydroponics, deep hydroponics, nutrient solution, efficiency index.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Jhusua David Reina García
Thesis, director de Tesis: Dr. Felipe Sánchez del Castillo

TABLA DE CONTENIDO

Páginas

DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTOS v
DATOS BIOGRÁFICOS vii
RESUMEN GENERAL viii
ABSTRACT ix
LISTA DE CUADROS xii
LISTA DE FIGURAS xv
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivos 8
1.2 Hipótesis 8
2 REVISIÓN DE LITERATURA 9
2.1 Importancia de la agricultura protegida a nivel mundial 9
2.2 Importancia de la agricultura protegida en México 11
2.3 Producción de jitomate en la agricultura protegida. 13
2.4 Sistema de producción convencional de jitomate bajo invernadero. 15
2.5 Sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en alta densidad. 18
2.6 Hidroponía y su importancia en la horticultura protegida. 21
2.7 Sistemas de producción en hidroponía. 24
2.8 Sistemas hidropónicos abiertos y cerrados. 27
3 MATERIALES Y MÉTODOS 34
3.1 Ubicación y fecha de establecimiento 34
3.2 Características del módulo de producción 34
3.3 Material vegetal 35
3.4 Determinación de propiedades físico-químicas del tezontle usado como sustrato. 36
3.5 Siembra y manejo de semillero 38
3.6 Diseño experimental 40

3.7 Descripción de los tratamientos 40
3.8 Conducción del cultivo 46
3.8.1 Manejo de plagas y enfermedades. 50
3.8.2 Condiciones del experimento 52
3.9 Variables evaluadas 53
3.9.1 Caracteres morfológicos 53
3.9.2 Variables de peso seco por órgano por planta 54
3.9.3 Rendimiento y sus componentes 54
3.9.4 Agua (L) y macronutrientes (g aportados en el ciclo por planta). 55
3.9.5 Macronutrientes absorbidos por el tejido vegetal (N, P, K, Ca, S) (g/planta): 55
3.9.6 Macronutrientes lixiviados (g por planta en el ciclo) contenidos en los drenajes (g): 57
3.9.7 Macronutrientes solubilizados o liberados del sustrato (mg/L de sustrato en el ciclo): 57
3.9.8 Litros de agua y gramos de macronutrimentos gastados por kilogramo de fruto producido: 59
3.9.9 Ahorro de agua y fertilizantes para cada tratamiento (%). 59
3.10 Análisis estadístico 59
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60
4.1 Caracteres morfológicos 60
4.2 Variables de peso seco por órganos y total 64
4.3 Rendimiento y sus componentes 67
4.4 Consumo de agua y macronutrientes durante el ciclo de cultivo 69
4.5 Macronutrientes absorbidos por planta ($g \cdot plata^{-1}$) 72
4.6 Macronutrientes lixiviados en los drenajes 75
4.7 Macronutrientes precipitados o retenidos en el sustrato 76
4.8 Eficiencia en el uso de agua y nutrientes 82
5 CONCLUSIONES 86
6 LITERATURA CITADA 88

LISTA DE CUADROS

CUADRO **PÁGINAS**

Cuadro 1. Cantidades de fertilizantes utilizados en los sistemas con y sin recirculación por cada 200 litros de solución nutritiva. 45

Cuadro 2. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables morfológicas durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 60

Cuadro 3. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables morfológicas durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 62

Cuadro 4. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables de peso seco por órganos y total durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 64

Cuadro 5. Comparaciones de medias para variables de índice de crecimiento durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 66

Cuadro 6. Cuadrados medios y niveles de significancia para el rendimiento por planta y sus componentes durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 68

Cuadro 7. Comparaciones de medias para el rendimiento por planta y sus componentes durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 69

Cuadro 8. Cuadrados medios y niveles de significancia para la variable consumo de agua por unidad de superficie de trasplante a fin de cosecha de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos. 70

Cuadro 9. Comparación de medias de la variable consumo del agua por unidad de superficie (m2) de trasplante a fin de cosecha de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos..... 70
Cuadro 10 . Gasto de agua en litros y macronutrientes en gramos por planta y (m^2) de jitomate durante 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 72
Cuadro 11. Macronutrientes absorbidos por planta de jitomate en gramos en tejido vegetal y en porcentaje de absorción (entre paréntesis) respecto al total gastado a los 100 días después del trasplante en diferentes sistemas hidropónicos. 73
Cuadro 12. Macronutrientes drenados (g/planta de jitomate) durante 100 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva. 75
Cuadro 13. Balance de nitrógeno en $g \cdot planta^{-1}$ y porcentaje respecto al total aplicado por planta (entre paréntesis) de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 78
Cuadro 14. Balance de fósforo en $g \cdot planta^{-1}$ y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 79
Cuadro 15. Balance de potasio en $g \cdot planta^{-1}$ y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 80
Cuadro 16. Balance de calcio en g·planta-1 y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100

días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 81
Cuadro 17. Balance de azufre en g·planta-1 y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos..... 81
Cuadro 18. Eficiencia de cada sistema en el uso de agua para producir un kg de fruto de jitomate en los sistemas hidropónicos probados..... 83
Cuadro 19. eficiencia de cada sistema en el uso de macronutrientes en gramos del elemento para producir un kg de fruto de jitomate en los sistemas hidropónicos probados. 84
Cuadro 20. Ahorro de agua ($m^3 \cdot ha^{-1}$) y macronutrientes ($kg \cdot ha^{-1}$) con respecto al testigo sin recirculación y sin acolchado durante 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos. valores entre paréntesis indican porcentajes de ahorro..... 85

LISTA DE FIGURAS

FIGURA **PÁGINA**

Figura 1. (A) Invernadero con extractores y (B) pared húmeda. 35
Figura 2. A: Aplicación de agua hasta la formación del espejo sobre el sustrato y B: Captura y medición del volumen de drenado del agua aplicada. 38
Figura 3. A. Charolas cubiertas de plástico posterior a la siembra; B: emergencia del hipocótilo de la plántula de jitomate. 39
Figura 4.Plántulas de jitomate a los a los 9, 16, 20 y 23 días después de la siembra. 40
Figura 5. Establecimiento del experimento. 41
Figura 6. Llaves de paso para controlar drenaje de los contenedores. 42
Figura 7. Cajas rellenas de tezontle de los tratamientos sin acolchado (A). Cajas rellenas de tezontle de los tratamientos con acolchado (B). 42
Figura 8.Sistema de riego de los cuatro tratamientos con sustrato, en donde A: es el sistema de conexión entre los tinacos y las cintillas de riego y B: muestra la distribución de las cintillas de riego, dos por cada hilera de cajas. 43
Figura 9.Cajas y cubiertas para el sistema de hidroponía profunda. 43
Figura 10. sistema de recolección de solución nutritiva drenada en los tratamientos 1,2,3 y 4. 44
Figura 11. Establecimiento del tratamiento de hidroponía profunda. 45
Figura 12.Trasplante en los tratamientos sin acolchar; B: trasplante en los tratamientos con acolchado. 47
Figura 13. Lavado de raíces y trasplante del tratamiento de hidroponía profunda. 47

Figura 14.Sistema de tutorado tipo holandés en los distintos tratamientos (A, B y C.) D: anillo plástico para tutorar. 48
Figura 15. (A) Despunte o poda apical dos hojas por encima del tercer racimo en todos los tratamientos y (B) Presencia y eliminación de los brotes laterales o chupones..... 49
Figura 16. A. Deshoje en los tratamientos sin acolchado; B: Deshoje en los tratamientos con acolchado y C: Deshoje en el tratamiento de hidroponía profunda. 50
Figura 17. Larva del lepidóptero Spodoptera spp. 51
Figura 18. Incidencia de cenicilla (Leveillula taurica) sobre el tejido foliar de la planta de jitomate. 52
Figura 19.Condiciones de temperatura y humedad relativa a lo largo del experimento. 53
Figura 20. Determinación de P con el método del amarillo de Vanadato-molibdato (Chapman y Pratt, 1973). 56
Figura 21. Muestreo en sustrato de tezontle a dos niveles. (A) 0-10 cm y (B) 10-23 cm. 58
Figura 22. Peso seco de los órganos a los 93 y 134 dds (%) 67

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años, en México se ha presentado un rápido crecimiento de la superficie cultivada con técnicas de la llamada Agricultura Protegida, particularmente en lo que a invernaderos y malla sombra se refiere. Según datos de la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (AMHPAC, 2018) de 132 hectáreas en 2003, se ha pasado a un total de 28,717 en 2017; incluso, si se añaden las 13,708 hectáreas existentes de macro túneles para el cultivo de fresas y otras frutillas se llega a un total de 42,425 hectáreas manejadas con estructuras de protección.

Concentrándose sólo en los invernaderos y malla sombra, la misma AMHPAC destaca que los productos obtenidos superan un valor comercial de 3000 millones de dólares anuales (más de sesenta mil millones de pesos) y generan 450,000 empleos directos, un 40 % de ellos de tiempo completo.

La implementación de estas estructuras (invernaderos) han permitido mejorar la climatización, los sistemas de riego, variedades, fertilización, técnicas de desinfección de suelo, técnicas de injertos, etc. En consecuencia, se han incrementado paulatinamente los niveles de producción. Aunado a esto, el desarrollo e incorporación de los sistemas de cultivo sin suelo, ha permitido mejorar y aumentar aún más la eficiencia de la producción bajo invernaderos (Fernández *et al.,* 2014).

A pesar de las grandes ventajas de producir bajo invernadero, tales como altos rendimientos y calidad, mayores niveles de sanidad e inocuidad de los productos obtenidos, seguridad en la producción con cierta independencia del clima, acceso a mejores mercados y, por lo tanto mayor potencial de alta rentabilidad económica, (Sánchez y Escalante, 1988; Urrestarazú, 2000; Resh, 2013), se han venido presentando problemas debido al manejo intensivo del suelo, que se pueden agravar con el tiempo; por ejemplo, se favorece el establecimiento de patógenos en el suelo después de algunos ciclos de cultivo (Takahashi, 1984), y son frecuentes la compactación, la acumulación de sales, los desequilibrios nutricionales y otros factores que afectan el rendimiento y la calidad de los

productos por los cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo (Liang *et al.,* 2006).

Por problemas como estos, cada vez, con más frecuencia se utiliza la técnica del cultivo sin suelo o, como se le denomina, “hidroponía”, bajo invernadero. El cultivo sin suelo, es una alternativa válida cuando por diversas causas el suelo pierde o no reúne propiedades agrícolas suficientes o ideales, debido a la presencia de enfermedades, salinización, mala permeabilidad, etc. (Fernández *et al.,* 2014). Actualmente, un 25 % de la superficie que se maneja con invernaderos (más del 50 % en invernaderos con alta tecnología), utiliza esta técnica para producir (Sánchez y Moreno, 2017).

Con el invernadero se logra el control de los requerimientos de la parte aérea de las plantas en cuanto a los factores climáticos, mientras que los sistemas hidropónicos se enfocan específicamente al ambiente radicular, y están diseñados con el objetivo de poner a la raíz en las condiciones ambientales más adecuadas para su óptimo funcionamiento. La conjunción de ambas tecnologías representa la agricultura comercial más avanzada con la que se cuenta en la actualidad a nivel mundial (Sánchez y Moreno, 2017).

En la mayoría de los sistemas hidropónicos que usan sustrato, se aplica el riego por goteo con una solución nutritiva que contiene fertilizantes disueltos con los nutrientes minerales esenciales para las plantas, en concentraciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Para que plantas de cultivo crezcan sin limitaciones nutricionales, la solución nutritiva debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 $dS \cdot m^{-1}$, y los nutrimentos minerales deben estar disociados en forma iónica en las proporciones y concentraciones adecuadas según sus tasas de absorción y en condiciones que eviten precipitados y antagonismos. La planta modifica el consumo de nutrimentos en función de sus fases de crecimiento y desarrollo, condiciones climáticas, y características de la solución nutritiva como la CE, pH, temperatura y oxígeno disuelto (Terabayashi *et al*., 2004; Jones, 2005; Sonneveld y Voogt, 2009).

Cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite su infiltración en el sitio, o se conduce fuera del invernadero, al sistema hidropónico se le conoce como abierto; por el contrario, si se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste de pH, CE y concentración de nutrimentos, se le llama sistema cerrado (Marfá *et al*., 2006).

Los sistemas hidropónicos abiertos son los más sencillos de manejar desde el punto de vista técnico, ya que, para mantener una nutrición mineral óptima basta con preparar una solución nutritiva balanceada con el pH y la CE adecuadas y aplicarla en cada riego en el sustrato químicamente inerte. Para evitar desequilibrios nutricionales a nivel de raíz, con cada riego se debe aportar un excedente de solución nutritiva para desplazar de la raíz la solución ya desbalanceada del riego anterior y reequilibrar la solución en la rizósfera. Este excedente puede representar entre un 15 y un 40 % más de la dosis necesaria en cada riego (Urrestarazu, 2000; Resh, 2013).

Desafortunadamente el agua es un recurso natural cada vez más limitado, por lo que es necesario buscar sistemas de producción donde su uso sea más eficiente. Asimismo, los fertilizantes son cada vez más caros y representan un porcentaje alto del costo de producción en sistemas hidropónicos (Huang, 2009).

Otra cuestión relacionada con los cultivos sin suelo es su impacto medioambiental, ya que la mayoría de las técnicas del cultivo sin suelo actualmente utilizadas constituyen sistemas abiertos, en los que, los lixiviados de la solución nutritiva se vierten directamente al agua, al suelo y/o acuíferos subyacentes y los contaminan con nitratos y fosfatos que provocan problemas como la eutrofización (Ramos, 1993). En este sentido, es cuestionable la sostenibilidad de dichos sistemas abiertos en lo que se refiere al uso del agua y de los fertilizantes (Marfá, 2000). Debido a que la dinámica de absorción de nutrientes por parte de las plantas y la concentración iónica de la solución nutritiva difícilmente coinciden. En consecuencia, es necesario emplear en la fertirrigación, fracciones de lavado de mayor o menor cuantía. Dicha práctica es

necesaria en los sistemas abiertos para mantener los niveles aceptables de la conductividad eléctrica de la solución del sustrato, lo que supone pérdidas de agua y de nutrientes por lixiviación (Marfá, 2000).

En este sentido, los sistemas de cultivos sin suelo con recirculación, permiten restituir al circuito de fertirrigación los lixiviados originados como consecuencia de riegos excedentes, de forma que se establezca un circuito cerrado, esta técnica mejora la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes en comparación con los abiertos y en suelo natural. Además, contribuye a disminuir el impacto medioambiental derivado de la lixiviación de fertilizantes en la horticultura intensiva (Zekki *et al.,* 1996), al evitar que grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y otros minerales contaminen ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Giuffrida y Leonardi, 2009; Pardossi *et al.,* 2009; Massa *et al*., 2010; Nakano *et al*., 2010).

Actualmente hay preocupación generalizada por la contaminación derivada de los lixiviados y pesticidas, algunos países están llevando a cabo acciones formativas, las cuales buscan fomentar buenas prácticas agrícolas en el tema mencionado y promover la adopción de recirculación en los cultivos sin suelos (Wilkerson *et al.,* 1991; Os, 1994). Como se evidencia, en países europeos (los cuales tienen la mayor superficie protegida con cultivos sin suelo), se presentan graves problemas de contaminación de sus aguas subsuperficiales, como es el caso de Holanda, que ha reconvertido sus cultivos sin suelo en cerrados (Alarcón *et al*., 2001), donde en la actualidad, más del 90 % de la producción en invernadero se realiza con sistemas hidropónicos y casi el 100 % de ellos son cerrados (Heuvelink *et al*., 2018).

Sin embargo, los sistemas cerrados también presentan desventajas que pueden afectar el rendimiento final y la rentabilidad económica. Dentro de los más importantes se pueden mencionar: incremento gradual de la CE de la solución nutritiva con el paso del tiempo, desbalance de la solución nutritiva, y mayor riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz (Tüzel *et al.,* 2009; Van-Os, 2009; Massa *et al.,* 2010). El desbalance de la solución nutritiva se genera

por la acumulación de los iones de más lenta velocidad de absorción por la planta (SO_4^{2-}, Ca^{2+} y Mg^{2+}), lo que rompe el equilibrio de nutrimentos y en la mayoría de las veces incrementa la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento, sobre todo con la presencia de un contenido alto de Na^+ y Cl^- en el agua de riego, obligando a desechar con frecuencia la solución nutritiva (Savvas *et al.,* 2009).

En la práctica comercial con sistemas hidropónicos cerrados, entre más largo es el ciclo de cultivo, mayor es la posibilidad de que aparezcan enfermedades en la raíz y, sobre todo, desequilibrios en la solución nutritiva, lo que eventualmente puede afectar el rendimiento respecto a sistemas sin recirculación; por ello, con frecuencia se reportan rendimientos menores en sistemas cerrados respectos a los abiertos en cultivos que se manejan en ciclos largos como el jitomate, chile pimiento o pepino, en los que durante varios meses coexisten etapas de crecimiento vegetativo con reproductivo (Savvas *et al*., 2009; Nakano *et al*., 2010).

Entre el 2007 y 2017, la producción de jitomate en México creció a una tasa promedio anual de 3.6%, llegando a un máximo histórico de 3.47 millones de toneladas. Durante ese mismo período, se redujo la superficie sembrada en campo abierto, pasando de 64,663 a 35,175 hectáreas, mientras que la superficie establecida con agricultura protegida (malla sombra e invernadero) se incrementó, de 1,973 a 15,198 hectáreas, en ese mismo periodo, representando el 63.3 % del volumen total producido en 2017 (FIRA, 2019)

Actualmente se cuenta con cultivares híbridos de jitomate altamente rendidores para este tipo de tecnologías. El sistema que se practica en Europa y América del Norte, y que se ha importado a México tal cual, consiste en utilizar cultivares de tipo bola o saladette de crecimiento indeterminado, con densidades de población de 2 a 3 plantas$\cdot m^{-2}$ que se dejan crecer a más de 3 m de altura, para cosechar de 15 a 25 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses y un periodo de inicio a fin de cosecha de al menos 5 a 7 meses, con rendimientos que, cuando se pueden manejar correctamente en invernaderos de alta

tecnología, pueden sobrepasar 400 a 500 t· ha^{-1}· $año^{-1}$ (Heuvelink *et al*., 2018; Sánchez *et al*., 2014).

El rendimiento anual que se puede lograr con este sistema es muy alto, pero técnicamente es difícil de alcanzar. En primer lugar, el ciclo de cultivo es tan largo que la probabilidad de que una plaga, enfermedad, o una afectación climatológica eventual disminuyan los rendimientos potenciales es muy elevada, sobre todo en invernaderos que no llegan a ser de alta tecnología (que son la mayoría en México). Además, como ya se señaló, con el uso de sistemas hidropónicos abiertos el desperdicio y contaminación de agua y nutrientes puede ser considerable.

También es posible que, por lo largo del ciclo, se presenten desordenes relacionados con la nutrición mineral o la transmisión de enfermedades de la raíz, que afecten el rendimiento y calidad, especialmente si se manejan sistemas hidropónicos cerrados.

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha estado trabajando en el desarrollo de sistemas de producción para acortar el ciclo de trasplante a fin de cosecha de 10 a 11 meses a menos de cuatro meses para el caso de jitomate. El sistema se basa en hacer el semillero en charolas con cavidades y espacios más grandes para lograr trasplantes exitosos con plántulas de más edad que las que se manejan par sistemas convencionales; esto se combina con despuntes (eliminación de la yema terminal) de las plantas para dejar sólo tres racimos por planta. Para compensar el menor rendimiento que se obtiene por planta, se siembra en densidades más altas (6 a 8 plantas m^{-2}), lo cual es posible por la menor área foliar que desarrolla cada planta con el despunte (Sánchez *et al*., 2012; Sánchez *et al*., 2014).

Los resultados que se han obtenido con este sistema muestran que es posible obtener al menos tres ciclos de cultivo por año con rendimientos anuales que superan al sistema convencional en un 50 % entre muchas otras ventajas (Sánchez *et al*., 2012).

Recientemente, en la misma Universidad, se llevó a cabo un experimento para determinar si lo corto de estos ciclos de cultivo puede permitir el uso de sistemas hidropónicos cerrados capaces de escapar a desequilibrios importantes de la solución nutritiva como para otorgar al menos el mismo rendimiento y calidad que ya se obtiene usando sistemas hidropónicos abiertos (Aragón, 2019).

Los resultados del experimento indican que los rendimientos y calidad de fruto lograda con los sistemas de recirculación fueron similares al sistema abierto; que el ahorro de agua y fertilizantes fue del orden de 20 % y que los métodos de recirculación a escala comercial fueron exitosos sin necesidad de realizar análisis químicos, todo ello gracias a lo corto del ciclo.

Sin embargo, se detectó que una alta proporción de los nutrientes aportados en la solución nutritiva quedan fijados en la superficie del sustrato (arena de tezontle), sobre todo en las superficies donde ocurre más evaporación, ocasionando bajas eficiencias de absorción de nutrientes en relación a lo suministrado con el agua de riego. Por ello, en el presente trabajo se pretende estudiar más a detalle la dinámica nutrimental que se da en los sistemas hidropónicos con sustratos que se consideran inertes como la arena de tezontle. Particularmente se quiere cuantificar, en cantidad y porcentaje, cuánto de cada nutriente se aporta, cuánto se absorbe y asimila por las plantas, cuánto se recupera en los drenajes, cuánto queda retenido en el sustrato en forma soluble y finalmente, cuánto queda precipitado o fijado en el sustrato a lo largo de un ciclo de cultivo. También se quiere saber en qué proporción el acolchado plástico de la superficie de las camas con sustrato puede disminuir esta fijación de nutrientes y hacer más eficiente la absorción nutrimental.

1.1 Objetivos

Los objetivos propuestos para esta investigación son:

1. Definir y comparar el rendimiento de frutos de jitomate, la dinámica nutrimental y la eficiencia de absorción de macronutrimentos en sistemas hidropónicos sin y con recirculación de la solución nutritiva.
2. Cuantificar la diferencia en fijación de nutrimentos y el ahorro de agua, nutrimentos y dinero que se puede lograr en sistemas hidropónicos sin y con recirculación de la solución nutritiva usando un acolchado plástico.
3. Comparar la dinámica nutrimental y las eficiencias de absorción nutrimental de estos sistemas con un sistema de hidroponía profunda (sin sustrato).

Con ello se busca optimizar el paquete tecnológico de producción de jitomate a tres racimos por planta para aprovechar los beneficios ecológicos y económicos de recircular la solución nutritiva sin arriesgar el rendimiento y calidad por los desequilibrios nutricionales, y sin recurrir a costosos y frecuentes análisis químicos para corregirlos, aspectos que hacen muy difícil el manejo de los sistemas con recirculación de la solución desde los puntos de vista técnico y comercial.

1.2 Hipótesis

Mediante el manejo de jitomate con ciclos de cultivo cortos es factible, sin la necesidad de análisis químicos, mantener equilibrada la solución nutritiva y bajo control la diseminación de enfermedades de la raíz en los sistemas hidropónicos con recirculación, por lo que rendirán al menos lo mismo que los sistemas abiertos, y permitirán un mayor ahorro en agua y fertilizantes.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de la agricultura protegida a nivel mundial

La agricultura, en general y por su naturaleza, está asociada a diversos riesgos; entre ellos destacan los climatológicos, económicos o los de limitaciones de recursos productivos (agua o de superficie). Por ende, tiene características básicas de protección contra estos riesgos inherentes a esta actividad. A consecuencia, la agricultura protegida surge como alternativa, se desarrolló especialmente en aquellas zonas de clima templado, afectadas principalmente por la nieve y el frío y que, por esas razones, necesitaban proteger los cultivos mediante el control de variables como temperatura, humedad y agua, para crear un microclima favorable dentro de un túnel protegido por cubiertas especiales (Programa PYMERURAL (2013).

La agricultura protegida, es un sistema de producción el cual, hablando en un sentido amplio y moderno, integra estructuras, tecnologías y técnicas, cuya finalidad es, controlar total o parcialmente el microclima que rodea la planta y recrea las condiciones idóneas de acuerdo a las necesidades de la especie durante su período de crecimiento, además de que, lo protegen de ciertos elementos biológicos y climatológicos (Pratt, y Ortega, 2019). Asimismo, para su implementación, considera los requerimientos climáticos de cada especie y los factores ambientales de la región.

Sus numerosas ventajas han permitido modificar la forma de producir alimento a nivel mundial, comparado con el sistema de producción convencional, ha logrado el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, genera seguridad en la producción con cierta independencia del clima, minimiza el impacto de las plagas y enfermedades, incrementa los rendimientos en espacios reducidos, produce alimentos con mayores niveles de calidad, sanidad e inocuidad, facilita el acceso a mejores mercados y finalmente posee mayor

potencial y alta rentabilidad económica logrando mejorar las condiciones de calidad de vida de los productores al aumentar sus ingresos (Sánchez y Moreno, 2017).

Entre las principales estructuras que se implementan bajo este sistema se destacan los invernaderos, túneles, casas sombra y las técnicas que se manejan son los acolchados, los enmallados, el fertirriego o riego por goteo y la hidroponía (Juárez *et al*., 2011).

Los invernaderos son construcciones agrícolas con una cubierta traslúcida, que tienen por objetivo reproducir o simular condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior. Los invernaderos permiten modificar y controlar de forma más eficiente los principales factores ambientales (Juárez *et al*., 2011).

Según León (2009) las principales ventajas que existen en los invernaderos son: mejor control de plagas y enfermedades, programación de fechas de cosecha, protección de la lluvia, mejores rendimientos y calidad del producto, protección contra los rayos ultravioleta, mejor control de la humedad y manejo de agua, aumento del rendimiento, reducción de costos de producción y de manejo del cultivo, mejores precios y mayor precocidad de las cosechas. Aunque también señala que existen algunas desventajas como un costo inicial alto, y necesidad de mano de obra calificada.

Actualmente está tomando gran auge la agricultura protegida, especialmente los invernaderos, por eso cabe recordar que esta tecnología se empezó a emplear en 1850 en Holanda (Piases bajos), donde se construyeron los primeros invernaderos de horticultura para el cultivo de uva, allí se descubrió que las plantas crecían rápidamente cuando recibían más luz y cuando el entorno cálido era constante. Sin embargo, a principios del siglo XX, la norma general era que los invernaderos tenían que ser de cristal, lo cual hacia costosas sus instalaciones. No fue así, hasta 1948 cuando el profesor norteamericano Emery Myers Emmert decidió emplear por primera vez el polietileno (PE) con propósitos

agrícolas, gracias a su facilidad de instalación, comenzó el verdadero crecimiento (Villarreal, 2013).

A nivel internacional, los países que figuran y son pioneros en la implementación de esta tecnología son China, España, Japón, Italia y Corea, donde se encuentran las mayores extensiones de cultivos protegidos (Programa PYMERURAL, 2013).

La superficie total de invernaderos y macro túneles a nivel mundial ronda el 1'600.000 ha, donde el contienen asiático concentra el 80% de la superficie (Espi *et al.*, 2006), donde China en el 2002, encabeza la lista con 1'250.000 Ha (Jiang *et al*., 2004), ya que desde 1981 ha tenido un crecimiento del 30% anual en su superficie, luego le siguen Japón y Corea del sur (Manzano, 2007).

La otra zona que presenta mayor concentración de este tipo de agricultura es la mediterránea con 190.000 ha donde destacan sobre todo Italia y España con 67700 y 55800ha, respectivamente (Pardossi *et al*., 2004), seguidas por Turquía con una superficie entre 23,000ha (Ozkan *et al*., 2004) y 27,000ha (Pardossi *et al.*, 2004). En el caso de España los invernaderos se encuentran concentrados en el sureste peninsular, en Andalucía y Murcia, donde están el 70% del total del país (Castilla y Hernández, 2005).

Mientras que en América son notorios los avances en Estados Unidos y México (Programa PYMERURAL, 2013). De acuerdo con la información anterior, en lo que va de este siglo se estima en México un crecimiento promedio, de estructuras de protección de cultivos, de 1000 a 1500 hectáreas por año.

2.2 Importancia de la agricultura protegida en México

En las últimas décadas, México ha venido desempeñando un importante papel a nivel mundial en la transición de su agricultura convencional (campo abierto) a una protegida, debido a una serie factores que impulsaron este sistema, los

cuales se destacan: productividad más elevada y constante, mayor eficiencia en el uso de la tierra, el agua, los fertilizantes, los pesticidas, la mano de obra y, en muchos casos, la energía; la capacidad para satisfacer la demanda de manera rentable durante los meses más fríos en México (menor producción agregada, precios más altos) y particularmente en la temporada de invierno de Estados Unidos para los cultivos de exportación (Pratt y Ortega, 2019).

Asimismo, un mejor control de las condiciones sanitarias y fitosanitarias para cumplir con los requisitos del mercado y reducir el riesgo y los daños a los cultivos (los cultivos dañados se traducen en precios y ventas más bajos); reducción de la vulnerabilidad y del riesgo asociado a condiciones meteorológicas adversas (lluvias torrenciales, granizo, sequía) que afectan negativamente a los cultivos, el suelo, la calidad y las condiciones sanitarias y fitosanitarias; mejor capacidad para responder a los requisitos cada vez más exigentes de los consumidores con respecto al uso de pesticidas, condiciones sanitarias y protección de los trabajadores, principalmente en los mercados internacionales, y con un aumento en los nacionales (Pratt y Ortega, 2019).

La Asociación Mexicana de Horticultura Protegida AC en 2018, destaca que este sistema se encuentra presente en los 32 estados del país, con una extensión que supera las 42 mil hectáreas de superficie protegida a nivel nacional. Además, menciona que en tan solo 14 años la agricultura protegida pasó en el 2003 de 132 hectáreas a 42,515 ha para el 2017, de las cuales aproximadamente 13,397 ha son de invernaderos, 15,320 de casa sombra y 13,708 Ha corresponde a estructuras como macrotúneles, determinando un crecimiento promedio anual de 3,000 ha. Sin embargo, unas 6000 a 7000 Ha de invernadero son cultivados con sistemas hidropónicos y casi el 100 % no recircula la solución nutritiva.

En cuanto a la producción de hortalizas protegidas, la AMHPAC (2018), indica que el cultivo de jitomate es la principal hortaliza producida en México bajo este

sistema, representando el (69%), seguido por el pimiento (17%) y el pepino (13%).

Además, la misma asociación señala que la agricultura protegida representa más de 3.2 millones de toneladas anuales, con un valor comercial superior a los 3,000 millones de dólares, logrando alojar alrededor de 450 mil empleos directos, de los cuales se estima que 166 mil son fijos y 287 mil son de temporal bajo la modalidad de invernaderos y casas sombras. Asimismo, la mayoría de su producción se exportan a los Estados Unidos (78%), Canadá (4%) y 18% restante al mercado nacional.

2.3 Producción de jitomate en la agricultura protegida.

De acuerdo con el Panorama agroalimentario del jitomate elaborado por los Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) en 2019, a nivel internacional, China e India lideran la lista como los países con mayor dinamismo en cuanto a la producción y consumo de jitomate; en contraste, Estados Unidos es el principal país importador y México el principal exportador de esta hortaliza. Esto ha permitido que, en los últimos años, el área de siembra en campo abierto ha tenido una constante disminución, sin embargo, la productividad promedio por unidad de superficie ha aumentado, gracias a la implementación de tecnología.

De acuerdo con información de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (FIRA, 2019), la superficie cosechada de jitomate a nivel mundial creció a una tasa promedio anual de 1.4 % en el periodo del 2007 al 2017, con un total de 4.8 millones de hectáreas. De las cuales, 57.4 % del total de superficie cosechada se concentró en cinco países: China (21.2%), India (16.4 %), Nigeria (12.2%), Turquía (3.9%) y Egipto (3.8 %). En el caso de México, ocupó la onceava posición a nivel mundial (con 1.9% de participación).

Solo en el periodo del 2007 al 2017, México produjo 3.47 millones de toneladas de jitomate, teniendo un crecimiento de una tasa promedio anual de 3.6%. En contraste, durante ese mismo período, la superficie cultivada en campo abierto se redujo a una tasa promedio anual de 5.9%, al pasar de 64,663 a 35,175 hectáreas, en cambio, la superficie establecida con agricultura protegida (malla sombra e invernadero) tuvo una tasa de crecimiento promedio anual de 22.7%. Así, en el 2003, la producción obtenida con el uso de estas últimas tecnologías pasó de 0.9% del total a 32.2% en 2010, y para el 2017, alcanzó hasta 63.3% del volumen total del jitomate cosechado en el país (FIRA,2019).

Según datos de FIRA (2019), en el 2017, la producción mundial de tomate se ubicó en un máximo histórico de 182.3 millones de toneladas. Durante el periodo del 2007 al 2017, creció a una tasa promedio anual de 2.9 %. Lo anterior, impulsado principalmente por incrementos en la productividad promedio. El 61% de la producción se concentró en China (32.6%), India (11.4%), Turquía (7%), Estados Unidos (6%) y Egipto (4%). México ocupó la novena posición con una participación de 2.3%.

De acuerdo con SAGARPA, el 60% de la producción en invernaderos se destinada a exportaciones y 70% corresponde a tomate (Estado actual de la agricultura protegida en México, 2017).
Solo comparando el sistema de producción convencional con el protegido se puede determinar que en el primero se alcanzan rendimientos alrededor de las 40 $ton \cdot ha^{-1}$ para el cultivo de jitomate, en cambio en agricultura protegida se pueden obtener hasta 300 o 400 $ton \cdot ha^{-1}$. El jitomate es la principal hortaliza que se produce bajo este esquema, cinco de cada 10 instalaciones son de esta hortaliza, según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (Estado actual de la agricultura protegida en México, 2017).

Las inversiones en agricultura protegida buscan mejorar los niveles de rentabilidad en la producción, principalmente en la que se destina al mercado de

exportación. En este caso, la agricultura protegida ayuda a ejercer determinado grado de control sobre los diversos factores del medio ambiente, permitiendo con ello minimizar las restricciones que las condiciones climáticas adversas tienen sobre los cultivos.

En consecuencia, desde el 2003, el volumen de jitomate obtenido en agricultura protegida ha aumentado, y desde 2012 supera al obtenido en campo abierto, pasando en el 2003, de 19,268 toneladas (0.9 % del total) a 733,178 toneladas en el 2010 (32.2 % del total) y, 2.2 millones de toneladas en el 2017 (63.3 % del volumen total). Cabe destacar que, el cultivo en agricultura protegida se concentra en Sinaloa, Baja California y San Luis Potosí, aunque también ha adquirido mayor importancia en otras entidades como Jalisco, Coahuila, Puebla, Sonora, Guanajuato, Baja California Sur y Oaxaca (FIRA, 2019).

FIRA (2019) destaca que, en el 2017, 56.3 % de la producción nacional de tomate se concentró en cinco estados, entre ello se destacan: Sinaloa (27%), San Luis Potosí (9.8%), Michoacán (7.3%), Jalisco (6.3%), y Zacatecas (5.6%). El mayor dinamismo en la producción se registró en San Luis Potosí, donde la producción creció a una tasa promedio anual de 11% entre 2007 y 2017.

El cultivo del tomate rojo es el cuarto en importancia por su contribución en el valor de la producción agrícola primaria en México. En 2017, participó con 4.3% del total, después del maíz (17.1%), el aguacate (6.8%) y la caña de azúcar (6.5%).

2.4 Sistema de producción convencional de jitomate bajo invernadero.

Dada las condiciones ambientales extremas que viven países nórdicos de Europa, Asia y América, es imposible cultivar jitomate a campo abierto, a consecuencia, se diseñaron los invernaderos con el fin de modificar y otorgarle al cultivo las condiciones óptimas para su crecimiento. Al trabajar bajo estas

estructuras, le permite al productor proporcionar calefacción y dióxido de carbono en época de invierno, implementar técnicas como la hidroponía, hacer uso sustratos (como turba o lana de roca), y controlar el ambiente de la raíz (brindándole condiciones de temperatura, minerales y suministro de agua), logrando obtener rendimientos con un promedio anual entre la 200 y 500 ton·ha^{-1} (Picken, 1984; Van de Vooren *et al.*, 1986; Resh, 1996; Hannan, 1998; Peet y Welles, 2005).

De acuerdo con Sánchez y Ponce (1998), en México, el sistema convencional de producción de jitomate en invernaderos, consiste principalmente en el uso de variedades de jitomate de hábito indeterminado, cuyo ciclo de cultivo dura entre 10 y 11 meses**.** Las plantas son sembradas en suelo mejorado o frecuentemente en sustratos hidropónicos. La densidad de población que se maneja es de 2 a 3 plantas·m^{-2} y su único tallo se deja crecer a más de 7 m de longitud, permitiendo cosechar entre 15 hasta 25 racimos por planta durante un sólo ciclo de cultivo al año, (Van de Vooren *et al.*, 1986; Resh, 1996; Hannan, 1998; Peet y Welles, 2005). Logrando de esta manera alcanzar un rendimiento superior a 300 t ha^{-1} año^{-1} con el uso de invernaderos de alta tecnología (Resh, 1996).

Además, con este sistema, la siembra de la semilla se hace normalmente en charolas de poliestireno de 200 cavidades en semillero, en donde la plántula estará los primeros 30 días con óptimas condiciones ambientales, posteriormente se trasplanta en invernaderos que por lo regular tienen más de 5 m de altura. Aproximadamente a los 20 días después del trasplante (ddt) comienzan a aparecer las flores, la cuales a los 60 días se cosechan los primeros frutos de la planta (Jaramillo, 2006). El ciclo total del cultivo como normalmente se maneja tiene una duración aproximada de 11 meses.

Resh (1992) y Peet y Welles (2005), mencionan que, bajo condiciones hidropónicas, en Holanda este sistema se han reportado rendimientos de más de

500 t/ha/año con invernaderos de alta tecnología que permiten un excelente control de las condiciones ambientales.

Sin embargo, antes de que llegara esta tecnología a México, la producción de jitomate se realizaba exclusivamente a campo abierto y en estaciones del año bien definidas. Pero, en el centro de país, por las condiciones climáticas prevalecientes, generalmente la mayoría de los productores de jitomate en invernadero acoplan el sistema de producción a un calendario en donde la cosecha inicia a finales de junio y finaliza entre noviembre y mediados de diciembre, dependiendo de si se cuenta con algún sistema de calefacción o las temperaturas lo permiten (Jensen, 2004; Peet y Welles, 2005; Sánchez y Moreno, 2017).

Varias de las desventajas de trabajar bajo este sistema es que, aunque se tenga un buen manejo técnico y se logre obtener altos rendimientos, es importante considerar que el ciclo de cultivo es muy largo (10 a 11 meses), con un periodo de inicio a fin de cosecha de 5 a 7 meses (Méndez *et al*., 2005), donde las utilidades o pérdidas del productor quedan a merced de los oscilantes precios en el mercado, al ser un ciclo muy largo se incrementa el riesgo de aparición de plagas y enfermedades que se presentan en etapas tardías, así como, la dificultad técnica y el costo para su control (Vázquez *et al*., 2007).

Además, este sistema es altamente tecnificado y su manejo cultural es difícil de realizar, como el descolgado de las plantas (Vázquez *et al*., 2007), por lo que requiere de invernaderos con mayor altura cuyo costo es elevado (Sánchez *et al*., 2009). Se establece muy lentamente el índice de área foliar óptimo por lo que en las primeras semanas después del trasplante la energía solar es subutilizada (Sánchez *et al*., 2009). Asimismo, el costo de producción es muy elevado llegando eventualmente a 500,000 dólares $Ha \cdot Año^{-1}$ (Méndez *et al*., 2005; FIRA, 2007 citado por Salazar *et al*.,2017).) y finalmente, tiene el inconveniente para un mercado donde el precio del producto está fluctuando a lo largo del año, en el

sistema no hay oportunidad para concentrar la producción en un periodo de tiempo determinado (Vázquez *et al*., 2007).

La fluctuación de los precios en el transcurso del año, se deben a las particulares condiciones, tanto del mercado nacional como de exportación. Generalmente los meses iniciales de los largos periodos de cosecha son de alta producción, pero generalmente coinciden con los precios relativamente bajos, mientras que, en los meses finales, cuando los precios son los mejores del año (SNIIM, 2020), la producción mensual es muy baja, pues las plantas ya están muy viejas, la mayoría de ellas enfermas y la calidad de fruto disminuye, afectando negativamente la rentabilidad económica de los productores.

2.5 Sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en alta densidad*.*

Ante las dificultades anteriormente mencionadas en cuanto al manejo del sistema de producción convencional de jitomate, la Universidad Autónoma Chapingo, ha estado liderando y desarrollando, la creación de un sistema de producción alternativo, más fácil y económicamente favorable, sobre todo para los pequeños y medianos productores bajo invernadero en México, el cual se enfoca en acortar el periodo de trasplante a fin de cosecha a menos de cuatro meses dando la posibilidad de obtener al menos tres ciclos de cultivo por año.

Para lograr acortar el ciclo de cultivo, se recurre a dos estrategias que se combinan en el mismo ciclo de cultivo:

El primero consiste en reducir el periodo de trasplante a fin de cosecha haciendo el trasplante con plántulas de mayor edad, (entre 45 a 50 días de sembradas, en vez de las de 25 a 30 días de edad al trasplante que se manejan con los sistemas convencionales, lo que permite adelantar el tiempo que transcurre entre el trasplante y el inicio de la cosecha de 20 a 30 días.

El segundo, se basa en realizar un despunte temprano al ápice de la planta (eliminación de la yema terminal) dos hojas por encima de la tercera inflorescencia, de tal manera que se pueda cosechar sólo tres racimos de cada planta, en un periodo de inicio a fin de cosecha de sólo 30 días, en vez de los cinco a siete meses que se ocupan para cosechar las plantas manejadas en el sistema convencional. Además, estableciendo densidades de población de hasta 12 plantas·m^{-2} de superficie útil (8 plantas·m^{-2}) (Sánchez y Corona, 1994; Sánchez y Ponce, 1998; Ucán *et al*., 2005; Sánchez *et al*., 2010).

Este paquete tecnológico posee diversas ventajas comparado con el convencional, entre ellas se destacan las siguientes:

1. **Programación de la fecha de cosecha de uno de los tres ciclos para el periodo de mayor precio de venta en el año** (Sánchez *et al*., 2012). esta es la principal ventaja del sistema para los pequeños y medianos productores de jitomate en invernadero que tienen como principal mercado las centrales de abasto. De acuerdo a datos, promedio de varios años, de precios de venta al mayoreo de bodegueros de centrales abastos como las de la Ciudad de México (SNIM, 2020), se puede estimar un precio de venta aproximado de los productores a lo largo del año. Del análisis de estos datos se destaca que los meses de noviembre y diciembre representan una ventana de oportunidad para el productor, pues son en los que el precio del jitomate de primera calidad es más elevado en la mayoría de los años.
2. **Mayor rendimiento por año con costo de producción similar por kg producido que el sistema convencional**. Resultados experimentales (Sánchez *et al.,* 2012) y validaciones comerciales con empresas productoras de jitomate en Acatzingo, Puebla (Sánchez *et al.,* 2016) han mostrado que los rendimientos por año son superiores en aproximadamente un 50 % con el sistema de tres racimos por planta y tres ciclos por año en relación al sistema convencional de un ciclo largo anual con base en tecnología mediana a alta, mientras que los costos de producción por kilogramo producido son similares en ambos sistemas.

3. **Mayor porcentaje de frutos de primera calidad**. El porcentaje de frutos de más tamaño y más calidad es mayor con el sistema de tres racimos por planta porque: 1) las plantas se cosechan cuando todavía están jóvenes, vigorosas y generalmente sanas; 2) Como son sólo tres los racimos por planta que están creciendo casi al mismo tiempo, la competencia entre sus frutos es relativamente baja; 3) El despunte de la planta quita a los frutos la competencia que representaría el crecimiento del tallo, de nuevas hojas y de frutos que se formarían en racimos posteriores, quedando más azúcares disponibles para su crecimiento (Sánchez y Ponce, 1998; Méndez *et al*., 2005; Vázquez *et al*., 2007).
4. **Escape a enfermedades por lo corto del ciclo**. Para el sistema de producción a tres racimos por planta, el periodo de trasplante hasta el fin de la cosecha es corto (100 a 110 días), y esto puede ayudar a evitar problemas de plagas y enfermedades, sobre todo de aquellas que suelen aparecer en plantas de mayor edad como muchas provocadas por hongos o virus (Sánchez *et al*., 2010; Sánchez *et al*., 2012).
5. **Es más más fácil el manejo técnico del cultivo.** Esto entre otras cosas porque el tutorado es más simple, no hay la difícil y delicada labor del bajado de plantas, se reducen en gran medida los periodos de deschupone y deshojado, por lo corto del ciclo se hacen menos aplicaciones de pesticidas y productos químicos, se facilita el control de la nutrición y de las plagas y enfermedades que pudieran aparecer, dura menos tiempo la labor de cosecha, lo que significa menos cortes por ciclo y menos jornales ocupados en esa labor (Sánchez y Moreno, 2016).

Desde luego el sistema a tres racimos por planta también presenta algunas desventajas, donde se destacan las siguientes (Sánchez *et al.,* 2012; Sánchez y Moreno, 2016):

1. **Mayor gasto anual en semilla.** Esta se considera como la principal desventaja que tiene que afrontar el sistema. Dado que la densidad es alta (8 plantas/m2) y se hacen tres ciclos por año se gastan 27 semillas/m2/año

(considerando un 10 % más por reposición de las que no nacen o de plántulas que se enferman en el semillero), en el caso del sistema convencional bastan 3.5 semillas·m^{-2} al año. El problema viene dado no tanto por la cantidad requerida sino por el costo de la semilla que suele ser alto, ya que se utilizan híbridos importados muy mejorados, con características especiales apreciadas en el mercado y que incorporan resistencias a múltiples enfermedades.

2. **Necesidad de más espacio de semillero.** Dado que, para cada ciclo de cultivo se maneja una mayor densidad de plantas en el invernadero de producción y de que se requiere un mayor espacio entre plántulas en el semillero para lograr retrasar el trasplante hasta los 40 a 45 dds, se necesita contar con un semillero más grande que para el sistema convencional.
3. **Más gasto en charolas y sustrato para semillero.** Con el sistema de tres racimos por planta en alta densidad se ocupan por hectárea, 1500 charolas de 60 cavidades rellenas con 200 ml de sustrato por cavidad, en tanto que con el sistema convencional se requieren sólo 175 charolas de 200 cavidades rellenas con 25 ml de sustrato por cavidad.
4. **Más gasto en jornales para la etapa de semillero y para el trasplante.** Con el sistema de tres racimos por planta en alta densidad, se tiene que manejar el semillero con 90,000 plantas para realizar el trasplante de 80,000 plantas·ha^{-1} tres veces al año, mientras que con el sistema convencional el semillero es con 40,000 plántulas para trasplantar 30,000 y son labores que se realizan una vez cada año.

2.6 Hidroponía y su importancia en la horticultura protegida.

En 1699, en Inglaterra el científico Woodward, fue el primero en hacer crecer las plantas en diversos recipientes en medio liquido al que había añadido diferentes cantidades de suelo. En 1860, el químico alemán Sachs y autores contemporáneos como Knop, prescindieron totalmente de los componentes del suelo, y desarrollaron el cultivo en una disolución nutritiva, la cual denominaron

“nutriculture”. Varias décadas después, en 1929 y años posteriores el profesor W. F. Gericke del departamento de nutrición vegetal de la Universidad de California, transfirió toda la tecnología desarrollada en laboratorio a fines comerciales, desde entonces los cultivos sin suelo han experimentado un gran avance en todo el mundo, fundamentalmente ligado al desarrollo de los plásticos en la agricultura (Resh, 1992).

Para 1938, Gericke había desarrollado los primeros cultivos comerciales de plantas sin suelo, el cual denomino hidroponía (Alarcón, 2006; Urrestarazu, 2004). Esta palabra se deriva del griego “*hidro*” (agua) y “*ponos*” (labor o trabajo) lo cual significa literalmente “trabajo en agua” (Durán, 2010).

Sánchez y Escalante (1988) definieron la hidroponía como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas son irrigadas con una solución compuesta de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y, en el que, en vez de suelo, se puede utilizar como sustrato un material inerte y estéril o la solución acuosa de nutrientes (llamada también solución nutritiva); el objetivo de esta técnica es otorgarle a la raíz un ambiente con óptimas condiciones posibles, para que ésta cumpla con sus funciones de nutrir a la parte aérea con agua, nutrientes y producción de hormonas vegetales de manera óptima.

Bajo las estructuras de invernadero y mallas sombra, el suelo puede llegar a ser una limitante en la producción intensiva. Debido a que, este sistema genera una gran presión sobre el mismo y facilita el establecimiento de patógenos con forme pasan los ciclos de cultivo (Takahashi, 1984).

Al igual, el continuo uso de fertilizantes ciclo tras ciclo, provoca la acumulación de sales con frecuencia en la producción intensiva de hortalizas, que afectan directamente el rendimiento del cultivo por la alteración de las propiedades químicas y físicas aptas para la producción (Liang *et al*., 2006; Blanco y Folegatti, 2002). Además, existen zonas con condiciones climáticas favorables para el establecimiento de cultivos protegidos, sin embargo, las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo no son las más adecuadas. Ante estas dificultades, la hidroponía surge como una alternativa.

Una de las razones, por la cual se decidió adoptar este tipo de técnicas fue principalmente de índole sanitaria. En efecto, en determinados suelos fue inviable continuar cultivando algunas especies dentro de los invernaderos, como consecuencia de la infestación debida a propágulos de patógenos persistentes de difícil erradicación, por ejemplo, *Fusarium sp* y *Phytophtora sp (*Marfa, 2000*).*

Sin embargo, un suelo infestado no ha sido la única razón, sino también un suelo infértil o cuando no hubiera disponibilidad del mismo, gracias a estas razones, el cultivo sin suelo se logró expandir por todo el mundo. Esta técnica, además, aporta mejoras a dos ámbitos: la cantidad y calidad de cosechas y a la estructura de los insumos empleados en la producción *(*Marfa, 2000*).*

En principio las técnicas de cultivo sin suelo, o como se les denomina, cultivos hidropónicos, se desarrollaron y promocionaron como un complemento necesario del invernadero, los resultados esperados por la mejora de las condiciones medioambientales proporcionadas por las complejas y caras instalaciones no podían verse comprometidas por los imprevisibles parámetros del suelo. En consecuencia, era necesario contar con un sistema de cultivo más seguro, uniforme y de fácil control (Cánovas, 1999). Actualmente varios sistemas de cultivo sin suelo se han desarrollado, solucionando satisfactoriamente este problema, entre ellos se destacan:

Los medios radiculares acuosos como la clásica técnica del Film nutritivo (NFT) o los medios solidos que generalmente se denominan sustratos; otra característica común de esta técnica es, que emplea el fertirriego, aplicando de forma continua una solución nutritiva (SN), ya sea mediante goteo, inundación, flujo y reflujo o flujo continuo *(*Marfa, 2000*).*

El medio radicular está limitado y soportado por lo que generalmente se le denomina contenedor que puede adoptar formas muy diversas según la técnica: bolsa de cultivo, canal, tabla, maceta etc. La solución nutritiva debe proporcionar

a la rizosfera no solo los nutrientes y el agua necesarios para el desarrollo de las plantas, sino también el oxígeno que se requiere para la respiración radicular *(*Marfa, 2000).

Entre las múltiples ventajas que posee este sistema en relación con el sistema convencional en suelo, Benoit y Ceustemans (1994) se destacan las siguientes:

- Homogeneización del cultivo, y en particular el medio radicular.
- Exclusión de infecciones de suelo y del uso peligroso desinfectantes.
- Drástica reducción de energía aplicada al acondicionamiento ambiental de la raíz.
- Reducción del consumo de agua.
- Uso eficiente de nutrientes.
- Mejor control del desarrollo vegetativo y productivo de la planta.
- Producción mayor y más temprana.
- Producción de mayor calidad.
- Racionalización del trabajo (ergonomía).
- Mayores posibilidades de mecanización y robotización.
- Si bien gran parte de las ventajas señaladas han sido claramente conseguidas, en contrapartida se ocasionan varios inconvenientes, tales como los residuos sólidos y la contaminación de drenajes.

2.7 Sistemas de producción en hidroponía.

Para el éxito de este sistema de producción, basado en la técnica de hidroponía, Sánchez y Escalante, (1988), destacan la integración e interacciones entre los diferentes componentes o elementos. Entre ellos se mencionan: la planta, el sustrato, el contenedor, la solución nutritiva, el método de riego y drenaje y el régimen climático.

Además, sus diversas ventajas comparado con el sistema convencional en suelo, desde el punto de vista técnico y económico combinada con el uso de

invernaderos, sobresalen: la posibilidad de alcanzar altos rendimientos por m^2 empleando altas densidades de plantas, un balance adecuado de aire, agua y nutrientes para la raíz por lo cual la planta crece mejor, es posible un mayor control y corrección inmediata del pH en la solución nutritiva, así como deficiencias o toxicidades en la planta. se logra mayor control de plagas, enfermedades y malezas y facilidad de esterilización de los sustratos (Cánovas y Magán, 2003; Alarcón, 2006; Raviv y Lieth, 2008).

Por otra parte, en este sistema de producción, las plantas crecen en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte (Urrestarazu, 2004), lo que permite desarrollar el sistema radical de las plantas en completa independencia del suelo. Asimismo, permite obtener cosechas fuera de temporada, con productos de mayor calidad, precocidad, uniformidad e inocuidad, al igual un ahorro significativo de insecticidas, fungicidas y mediante la reutilización de la solución nutritiva de agua y fertilizantes, así como evitar pérdidas por evaporación (Sánchez y Escalante, 1988; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

Se genera así, un sistema de producción que permite de manera rentable producir alimentos en zonas donde la agricultura convencional no sería posible (Sánchez y Escalante, 1988).

También, se han identificado algunas desventajas, en dos aspectos importantes:

- El nivel de capacitación que se requiere para operar los sistemas (conocimiento de fisiología y nutrición vegetal del cultivo para el manejo del sistema en cuestión), y
- El costo elevado de la inversión inicial (invernadero, sistema de riego, depósitos de agua, semillas de alta producción, fertilizantes altamente solubles y equipos de dilución para las soluciones nutritivas madre).

Estos factores, hacen que tanto productores pequeños y medianos, requieran del financiamiento de entidades financieras o apoyos de proyectos sociales del gobierno. Aunado a esto, la inversión se incrementa al aumentar el nivel de

automatización de las variables en el invernadero (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013) lo que ocasiona otra desventaja para el productor.

De acuerdo con el nivel de automatización, implantación de otras tecnologías y el uso de medios en el que se desarrolla el sistema radical, este sistema se puede clasificar en tres grupos:

- Cultivo aeropónico: este sistema consiste en mantener a las raíces de las plantas suspendidas en el aire dentro de una cámara obscura, donde se inyecta la solución nutritiva periódicamente por medio de microaspersores o nebulizadores con el objetivo de mantener 100 % de humedad relativa dentro de la cámara.

- Cultivo en solución: en este sistema las raíces de las plantas se encuentran sumergidas, total o parcialmente en la solución nutritiva, sin que reciban luz que pueda favorecer cambios en la acidez de la solución, competencia por la toma de nutrientes y menor disponibilidad de oxígeno ocasionando un mal funcionamiento de la planta. Este sistema emplea un soporte en la parte superior del tallo, un aspecto importante de este sistema es que se debe suministrar mediante una bomba o compresor la cantidad de oxígeno necesario para evitar daños en la raíz (Resh, 1996).

- Cultivo en sustrato: esta técnica emplea materiales inertes u orgánicos cuya función es proporcionar a la planta soporte, condiciones de oxígeno y humedad óptimas para su desarrollo.

Los sustratos inertes generalmente provienen de rocas ígneas y de materiales inorgánicos como grava y arenas, también puede ser usada vermiculita, turba o perlita. La turba, fibra de coco o la cascarilla de arroz son considerados sustratos orgánicos (Sánchez y Escalante, 1988; Urrestarazu, 2004; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013; Urrestarazu, 2015) y de acuerdo al uso de solución nutritiva, los sistemas hidropónicos se pueden dividir en sistemas abiertos o cerrados.

2.8 Sistemas hidropónicos abiertos y cerrados.

Los agrosistemas, atendiendo al uso que en ellos se haga del agua y sales disueltas que transportan, se pueden clasificar en:

Sistemas abiertos o sistemas a disolución perdida: son aquellos en los que la disolución sobrante drena, percola, se infiltra en el subsuelo o simplemente sufre escorrentía fuera del suelo fértil o contenedor, sin que el cultivo vuelva a tener ningún contacto con la misma (Urrestarazu y Salas, 2004).

Sistemas cerrados (SC) o sistemas con recirculación de lixiviados: Son aquellos en los que la disolución sobrante vuelve a incorporarse, total o parcialmente como suministro a la fertirrigación del mismo cultivo. También se incluye aquellos sistemas en los que la disolución nutritiva es también estática (Urrestarazu y Salas, 2004).

En cuanto a la disposición de los elementos en los sistemas de recirculación (sistemas cerrados), cuando se recoge el agua o solución nutritiva para su posterior reutilización, aparece un problema específico respecto a su manejo. Conceptualmente, existen dos formas de operar. En una de ellas, el agua de drenaje se mezcla con el agua de riego y, posteriormente se realizan los debidos ajustes de los parámetros como conductividad y pH con ayuda de un ordenador de fertirrigación. Esta forma de actuar es apta cuando las aguas de riego son de buena calidad y apenas existe acumulación de sales en los drenajes.

A primera vista, parece insostenible que a través de esos drenajes se puedan perder, emitir o desechar, una cantidad importante de agua y de nutrientes, y con ello, surgen tres razones para la recirculación, dos de ellas medioambientales:

- Económica: perdida del coste de agua y fertilizantes.
- Medioambiental: derroche de un recurso limitado como el hídrico.
- Contaminante: de suelos y en su caso de acuíferos por fertilizantes e incluso fitosanitarios (Urrestarazu, 1996)

Desde el punto de vista económico, se justifica la implementación del sistema con recirculación (sistema cerrado) por el ahorro significativo de agua y fertilizantes.

En cuanto a la razón medioambiental, específicamente en el caso de los sistemas abiertos, hay que tener consideración o atención por la contaminación de elementos fertilizantes como el nitrógeno y el fosforo principalmente y por los productos fitosanitarios, cuando se vierte el drenaje al suelo. Ya que, se puede incurrir en el peligro de contaminar las aguas tanto superficiales como subterráneas y el propio suelo.

La contaminación de aguas superficiales por elementos nutritivos provoca el llamado proceso de eutrofización, que consiste en el desarrollo desmesurado de vegetación acuática que en sus procesos de renovación produce una biomasa a descomponer que aumenta la demanda biológica de oxígeno hasta límites que impiden el mantenimiento de la fauna.
En el caso de las aguas subterráneas la principal contaminación se produce por los nitratos. En principio, esta contaminación es común en todos los procesos agrícolas, el riesgo se circunscribe a la entrada por un determinado punto de una fuerte concentración de los mismos. Esto se debe a la creación en el suelo de canales preferentes de percolación que producen una contaminación importante.

Finalmente, la lixiviación en acuíferos por productos fitosanitarios aportados como practica de tratamiento en sistemas hidropónicos sin recirculación (abiertos), va a depender de la persistencia del producto y la absorción de este por el suelo (Urrestarazu y Salas, 2004).
En referencia a los sistemas cerrados muchos autores ven en ellos una posibilidad de mejora medioambiental (Urrestarazu, 1996; García, 1997; Urrestarazu y García, 1999) incluso algunos otros como Bohme (1996) consideran que el paso a estos sistemas se debe hacer exclusivamente bajo esta justificación medioambiental.

Como cualquier agrosistema un invernadero de producción hortícola nunca puede responder estrictamente al concepto de sistema cerrado, ya que considera la dependencia de la energía necesaria de entrada y al menos la renovación de los materiales que contienen los productos hortícolas que necesariamente se extraen del invernadero (Urrestarazu y Salas, 2004).

Los sistemas cerrados aplicados a la fertirrigación han sido utilizados desde hace décadas en un gran número de países centroeuropeos en cultivos sin suelo **(**Cooper,1975, 1977; Massey y Winsor, 1980; Sonneveld y Straver, 1994; Urrestarazu y Salas, 2004), y, por tanto, en ellos se tiene una gran experiencia acumulada (Noguera *et al*., 1986,1988; García *et al*., 1998; García y Urrestarazu, 1998).

A continuación, se mencionarán las ventajas y desventajas de ambos sistemas:
Diversos expertos demuestran que recircular una solución nutritiva provoca que progresivamente se aumente la conductividad eléctrica de esta. Trabajos realizados por Urrestarazu (1996) muestran como la conductividad eléctrica de los drenajes es superior a las de la solución de entrada, por eso cuando se establece esa comparación del sistema cerrado con respecto al abierto, demuestra que en esas condiciones necesariamente se incrementa la CE de las soluciones nutritivas por la reutilización de los drenajes (Urreztarazu y García, 1999; Savvas, 2002).

Por el contrario, cuando se trabaja en un sistema abierto con sustrato, se puede mantener más o menos constante la conductividad eléctrica de la disolución disponible para la rizosfera, para ello, se aplica una retroalimentación consistente en variar la CE de entrada y/o volumen de drenaje, cabe recalcar que el drenaje no se reincorpora al sistema de nuevo (Urrestarazu y Salas, 2004).

Sin embargo, cuando este drenaje se incluye en el sistema, aparece la limitación de una mayor conductividad, por ello se demuestra que la disolución de fertirrigación va aumentando progresivamente (García y Urrestarazu, 1998).

.

En cuanto a la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes en ambos sistemas, Van der Houwen y Ruijs (1993) concluyen en su investigación en el cultivo de rosas, que el ahorro del agua y fertilizantes fue de un 30% y 40% respectivamente, en el sistema cerrado.

También en los sistemas recirculantes aparecen problemas ligados a la propia naturaleza de las plantas. No hay que olvidar que las plantas excretan multitud de exudados radicales, en estos sistemas, los exudados merecen especial atención porque en gran parte son reincorporados de nuevo al sistema. La mayoría de ellos se degrada por las bacterias saprofitas que viven en la rizosfera (Bowen y Rovira, 1976), pero algunos de estos productos se han señalado como causa de la disminución del crecimiento radical, por ejemplo, la presencia de ácidos fenólicos a concentraciones muy bajas entre 1 y 50 µM, se ha descrito como fitotóxica (Vaughan y Ord, 1991).

Asimismo, la calidad del agua de riego se divide en dos alternativas: aguas de buena calidad agronómica (con CE ≤ a 0.5 $dS \cdot m^{-1}$), de mala calidad (cuando supera lo niveles de 1.5 $dS \cdot m^{-1}$) y calidad intermedia (cuando la CE esta entre 0.5 y 1.5 $dS \cdot m^{-1}$) (Urrestarazu y Salas, 2004). Consecuentemente, los inconvenientes de su uso se resumen en que al ser la CE del drenaje muy alta (de hasta 6 o más $dS \cdot m^{-1}$) se necesitaría una fuerte dilución de éste hasta niveles de uso más o menos razonables, aunque puedan considerarse altos (en torno a 2 o 4 $dS \cdot m^{-1}$), por lo tanto, como la única fuente de dilución es la propia agua de partida, no existe solución (Urrestarazu y Salas, 2004).

Al igual, es difícil con los fertilizantes comerciales establecer un equilibrio, que, si bien no es idóneo, cuando menos no genere graves problemas. Hay que tener

en consideración que al hablar de los drenajes (aunque puedan diluir con agua de riego) en definitiva irán con niveles muy superiores a los deseados de iones como cloruros, sulfatos, sodios etc., que por competencia interaccionan con el equilibrio adecuado añadido con la disolución nueva. Cuando estos inconvenientes no se superan quedan otras alternativas, como el de eliminar una cierta proporción de los drenajes; de esta forma, se han cuantificado diversos criterios de los límites a los que hay que llegar (Urrestarazu y Salas, 2004). Por ejemplo, en la investigación de Molitor y Fischer (1998), utilizan bajo criterio, eliminar la recirculación de la disolución cuando ésta supera los 5 $dS \cdot m^{-1}$.

Otra de los factores a considerar es el clima, ya que ejerce un efecto claro sobre los sistemas cerrados, de acuerdo con numerosas investigaciones, dedujeron que el modelo de absorción de un ion nutriente por unidad de planta, varía en función de la intensidad de irradiación, de la especie y del estadio fenológico, es más constante que la absorción de agua movida por la transpiración**.** Raviv *et al*., (1995) mencionan los principales problemas que aparecen con la recirculación de los drenajes en zonas semiáridas:

-Alta salinidad del agua de riego

-Alta velocidad de transpiración que conduce a un rápido incremento de la salinidad en los drenajes.

-Fuertes cambios en las concentraciones iónicas en las aguas de riego y los drenajes.

-Elevado riesgo de expansión rápida de los problemas fitopatológicos.

Cabe mencionar que, en la mayoría de los sistemas hidropónicos establecidos, se aplica riego por goteo, con una solución nutritiva que contiene fertilizantes disueltos con los elementos minerales esenciales. Para que las plantas como el jitomate se desarrollen sin limitaciones nutricionales, debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 $dS \cdot m^{-1}$, y los nutrimentos minerales deben estar disociados en forma iónica en las proporciones y concentraciones adecuadas según sus tasas de absorción y en condiciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004).

Sin embargo, la evaporación de agua en el sustrato bajo esta modalidad, ya sea en turba o arena de tezontle es muy alta, sobre todo en las primeras etapas del cultivo. Por su alta rugosidad, este sustrato expone mucha superficie a la intemperie (aire y sol). Lo que causa una alta tasa de evaporación de agua y, por lo tanto, de acumulación de sales en la parte superior del medio de crecimiento debido a su precipitación (Argo y Biernbaum, 1995).

Para resolver ese problema, la técnica comúnmente empleada para evitar la pérdida de agua por evaporación y optimizar las condiciones de desarrollo para la raíz y por ende del crecimiento de las plantas ha sido el uso de acolchados plásticos.

El uso de esta lámina plástica sobre el suelo o superficie donde se cultivan las plantas (Díaz *et al*., 2001), puede ser de baja o alta densidad o de diversos colores (negro, blanco o aluminizado), variaciones que proveen al suelo de ciertas características especiales dependiendo de las necesidades del cultivo, entre ellas se destacan: inhibición del crecimiento de malas hierbas, mejoramiento de la retención de humedad, prevención de la erosión del suelo, obtención de altos rendimientos y cosechas más tempranas (Díaz y Dean, 2002).

En la investigación realizada por López *et al.* (2009) mencionan que la cobertura plástica tiene efecto en la reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie de suelos o sustratos, especialmente bajo sistemas de riego por goteo. Asociada con la reducción de la evaporación, existe un incremento general de la transpiración del cultivo, debido a la transferencia de calor sensible y radiativo desde la superficie de la cobertura de plástico hacia las adyacencias de la vegetación.

Al incrementarse la transpiración, aumenta el consumo hídrico y en consecuencia la absorción mineral, los cuales están influenciados por la temperatura de la

disolución contenida en la rizósfera; es decir, a mayor temperatura radical mayor absorción de sales (Urrestarazu y Salas, 2004) lo que implica una acumulación mayor de nutrientes en los tejidos de la planta.

Heuvelink y Dorais en el 2005, enfatizan que el color, tiene un efecto sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas por medio del incremento de la temperatura en la parte superior del suelo y la cantidad y calidad de luz reflejada para la planta.

Papaseit *et al.* (1997) mencionan que todos los plásticos empleados en el acolchado incrementan la temperatura del suelo durante el día, a excepción del blanco y el aluminizado que reflejan la luz. El plástico negro es el que menos retiene calor durante la noche. El plástico blanco aumenta considerablemente la cantidad de luz aprovechable para la planta.

Furuta *et al*. (1977) estudiaron el efecto del acolchado sobre la evapotranspiración en turba, la cual lograron reducir en un 26 %. Ibarra y Rodríguez, (1991) reportan que el acolchado plástico permite un ahorro de agua de 15 % en comparación con un sistema tradicional.

Sin embargo, aunque la mayoría de los estudios sobre acolchado han sido desarrollados en suelo y la información sobre su efecto en cultivos sin suelo es limitada (Farina *et al*., 2003) es interesante evaluar su rentabilidad para mejorar la eficiencia de los cultivos en sustrato.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y fecha de establecimiento

El presente experimento se llevó a cabo en el periodo del 10 de julio al 7 de diciembre del 2019 y se dividió en dos fases, la primera consistió en la etapa de campo, que se realizó en los invernaderos del área del Posgrado de Horticultura, pertenecientes al departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, en el municipio de Texcoco de Mora en el Estado de México; que se localiza a 19°51ʾ latitud Norte y 98°88ʾ longitud Oeste a una altitud de 2,377 metros sobre el nivel del mar y la segunda se llevó a cabo en el laboratorio de ecología del mismo departamento de Fitotecnia.

El clima del municipio de Texcoco de Mora es C (Wo) (w) b (iʾ) g, considerado como un templado subhúmedo (el subtipo más seco de los subhúmedos) con lluvias en el verano fresco y largo, poca oscilación de las temperaturas y con el mes más caliente antes del solsticio de verano, una temperatura media de 15,5 °C y un promedio anual de lluvias de 768 mm (García, 1988).

3.2 Características del módulo de producción

La investigación se realizó en un invernadero de una sola nave con doble pendiente líneas rectas (de tipo capilla de dos aguas), con dimensiones de 30,1 m de largo por 11,1 m de ancho (334,1 m^2), cubierto por polietileno térmico blanco de alta trasmisión de luz. Para el caso de la ventilación, este mismo cuenta con ventanas laterales protegidas con malla antiáfidos de 25x40 hilos por pulgada cuadrada. con un área de 108,6 m^2 (28,6 de largo por 1,9 m de alto) y con un sistema de enfriamiento evaporativo compuesto por una pared húmeda (9,8 m de largo por 1,9 m de alto) y 2 ventiladores-extractores (Figura 1). El suelo estaba cubierto en su totalidad con una fibra plástica color blanco (ground cover).

A **B**

Figura 1. (A) Invernadero con extractores y (B) pared húmeda.

3.3 Material vegetal

Se utilizó el híbrido Pai-Pai de jitomate, de tipo saladette, de la empresa Enza Zaden. Es un cultivar con hábito de crecimiento indeterminado, presenta una entrada precoz a cosecha, de fácil adaptación a condiciones de calor y frío no extremas. Es una planta compacta, con entrenudos cortos y con una excelente cobertura foliar con amarres continuos. Presenta frutos con peso aproximado a los 170 gramos, sin hombros, con extraordinaria vida de anaquel y sin problemas de maduración y con alta resistencia al *Virus del mosaico del tomate* (ToMV), *Fusarium oxysporum f. sp*. *Lycopersici (*Marchitez por Fusarium), *Verticillium albo-atrum* (Va) y *Verticillium dahliae* (Vd) (Marchitez por *Verticillium*) y con media resistencia al Virus del bronceado del tomate (*TSWV), Fusarium oxysporum f. sp. radicis-lycopersici* (Pudrición de corona y raíz por *Fusarium*), *Meloidogyne arenaria* (Ma), *Meloidogyne incógnita* (Mi) y *Meloidogyne javanica* (Mj) (https://www.enzazaden.com/mx/products-and-services/our-products/Tomates/Paipai).

3.4 Determinación de propiedades físico-químicas del tezontle usado como sustrato.

El tezontle es un mineral procedente de la erupción de los volcanes y constituido por silicatos de aluminio, formado por fragmentos y partículas de lava porosa de bajo peso. Es un material que presenta alta heterogeneidad en el tamaño de la partícula. Este sustrato se puede encontrar desde color rojo, negro hasta amarillo.

Para su uso comercial, este material pasó por un preseleccionado en las minas, del cual se obtiene una arenilla con la mayoría de sus partículas en diámetros de 1 a 5 mm ideal para cultivos en sistemas protegidos.

Para la estimación de las propiedades físicas de la arena de tezontle seleccionada para el experimento se usaron cuatro cajas de plástico rígido con las siguientes dimensiones: 50 cm de largo, 30 cm de ancho y 25 cm de profundidad, con un volumen de 34 L, a las cuales se le realizaron perforaciones en la parte inferior y se les acoplaron llaves de paso para permitir la captura de la solución drenada (Figura 2b).

Para la determinación de las propiedades físicas como: porosidad aparente (%), densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$), porcentaje de agua presente a capacidad de retención (%) y porcentaje de aireación a capacidad de retención del sustrato (%), se realizó el siguiente procedimiento:

- Inicialmente, se usaron 140 kg de de arena de tezontle húmeda, que posteriormente se pusieron a secar al sol dentro del invernadero aproximadamente 8 días.
- Pasado esos días y una vez seco el sustrato, se utilizó una probeta plástica de 1000 ml de capacidad, a la cual se le midió su peso estando vacía, y posteriormente se le agrego el sustrato seco, sin compactarlo.
- Nuevamente se pesó en la báscula, con el contenido del sustrato y se determinó su densidad aparente ($g \cdot cm^{-3}$). Esta propiedad se calculó con la diferencia entre el peso obtenido del contenedor lleno menos el peso del

contenedor vacío y el dato resultante se dividió por el volumen conocido del sustrato.

$$DA = \frac{\text{Peso de la probeta llena de sustrato} - \text{peso de la probeta vacia}}{\text{Volumen conocido del sustrato}}$$

- Seguidamente, se colocó un pedazo de malla antiafidos en el orificio de salida de cada una de las cuatro cajas plásticas utilizadas, esto con el fin de evitar que se obstruya la llave del drenaje.
- Luego, con la ayuda de una probeta de 1 L, se llenaron las cajas con el sustrato seco sin compactar hasta una altura de 23 cm. Se cuantificó el volumen de sustrato contenido en cada caja.
- Una vez llenas las cajas, se agregó agua lentamente sobre el sustrato, hasta que se alcanzó la altura del mismo nivel del sustrato (formando un espejo de agua sobre su superficie). Se cuantificó la cantidad de agua empleada.
- Con los datos del volumen de agua empleada y el volumen del sustrato que ocupó en el contenedor, mediante una regla simple de tres, se logró determinar la porosidad aparente total del sustrato expresado en porcentaje (%) usando la siguiente formula:

$$Porosidad\ aparente\ (\%) = 100\frac{(Volumen\ de\ agua\ aplicada\ (L))}{(Volumen\ del\ sustrato\ en\ el\ contenedor\ (L))}$$

- Posteriormente, se abrieron las llaves acopladas a las cajas para permitir drenar el excedente del agua durante media hora aproximadamente, (Figura 2B). Se midió la cantidad de agua drenada y se dedujo la retenida en el sustrato. Con base en el volumen total de sustrato, por regla de tres, se calculó el porcentaje de retención de agua y el porcentaje de aireación a capacidad del contenedor.
- Finalmente, obtenidos los resultados de la cantidad de agua agregada, retenida y drenada, se determinaron, el porcentaje de retención de humedad en base a volumen (RH) y la capacidad de aireación (CA) en porcentaje,

también en base al volumen total de sustrato. Se usaron las siguientes fórmulas.

$$\text{RH}\ (\%) = 100\frac{\left(Volumen\ de\ agua\ retenida\ (L)\right)}{\left(Volumen\ del\ sustrato\ en\ el\ contenedor\ (L)\right)}$$

$$CA\ (\%) = \ 100\frac{\left(Volumen\ de\ agua\ drenada(L)\right)}{\left(Volumen\ del\ sustrato\ en\ el\ contenedor\ (L)\right)}$$

A B

Figura 2. A: Aplicación de agua hasta la formación del espejo sobre el sustrato y B: Captura y medición del volumen de drenado del agua aplicada.

3.5 Siembra y manejo de semillero

Previo a la siembra, se realizó la desinfección con sales cuaternarias de amonio (5ml·L^{-1}) de las charolas, tinacos de 200 L y cajas plásticas que fueron usadas como contendores y depósitos de solución nutritiva.

Para la siembra se usaron cinco charolas de 60 cavidades de poliestireno expandido con volumen de 250 ml por cavidad. Como sustrato se utilizó una mezcla de turba (Peat moss) y perlita en relación 1:1 y se sembró una semilla por cavidad.

Posterior a la siembra las charolas se apilaron en columna y se forraron con plástico durante cuatro días hasta (Figura 3A) poco antes de la emergencia del hipocótilo (Figura 3B).

A B

Figura 3. A. Charolas cubiertas de plástico posterior a la siembra; B: emergencia del hipocótilo de la plántula de jitomate.

Durante los primeros 15 días después de la siembra (dds), las plántulas fueron irrigadas con una solución nutritiva al 50 % de su concentración; de ahí en adelante, hasta el fin de la cosecha se aplicó al 100 %. La solución al 100 % aportaba las siguientes concentraciones de nutrimentos en mg/L: Nitrógeno, 200; Fósforo, 40; Potasio, 250; Calcio, 280; Magnesio, 40; Azufre, 150; Fierro, 1; Manganeso 1; Boro, 0.5; cobre, 0.1 y Zinc, 0.1 (Aragón, 2019).

9 dds

16 dds

20 dds

23 dds

Figura 4.Plántulas de jitomate a los a los 9, 16, 20 y 23 días después de la siembra.

3.6 Diseño experimental

Para la investigación se usó un diseño experimental de bloques completamente al azar conformado por cinco tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones, el tamaño de la unidad experimental fue de ocho plantas que ocuparon cuatro cajas juntas ocupando una superficie de 0.6 m^2 útiles (Figura 5), resultando una densidad de población de 8 plantas·m^{-2} de invernadero, considerando el ancho de los pasillos de 0.6 m.

3.7 Descripción de los tratamientos

Figura 5. Establecimiento del experimento.

A continuación, se describen brevemente los sistemas hidropónicos evaluados como tratamientos:

1. Sistema sin recirculación de la solución nutritiva sin acolchado.

2. Sistema sin recirculación de la solución nutritiva con acolchado.

3. Sistema con recirculación de la solución nutritiva sin acolchado.

4. Sistema con recirculación de la solución nutritiva con acolchado

5. Sistema de hidroponía de flujo profundo o Deep Flow Technique (DFT).

De manera general, todos los tratamientos usaron como contenedores, cajas plásticas con las mismas dimensiones (50 cm de largo, 30 cm de ancho y 25 cm de profundidad), a cada una se le realizó una perforación en la parte inferior y se les acoplaron unas llaves que permitan el paso de la solución drenada y así mismo recolectar el excedente de cada riego (Figura 6).

Figura 6. Llaves de paso para controlar drenaje de los contenedores.

Para los tratamientos del 1 al 4, estas cajas fueron rellenadas con una capa de 23 cm de arena de tezontle rojo con tamaño de partículas comprendidas entre 1 a 5 mm de diámetro (Figura 7A). Además, a dos de los tratamientos, se les aplicó un acolchado de polietileno gris cal. 150 (Figura 7B)

A B

Figura 7. Cajas rellenas de tezontle de los tratamientos sin acolchado (A). Cajas rellenas de tezontle de los tratamientos con acolchado (B).

Cada uno de estos tratamientos tenía un tinaco con capacidad de 200 L para el suministro de la solución nutritiva correspondiente, para la distribución del riego sobre las plantas, se usaron cintillas de riego con goteros a cada 25 cm por cada tratamiento (Figura 8 A) Para la conexión de las cintillas con los tinacos, se

utilizaron tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro, unidos a llaves de paso, como se observa en la Figura 8B.

La frecuencia de los riegos y la cantidad de solución a aplicar de cada uno de ellos, se definió diariamente buscando que cada riego tuviera un drenaje equivalente al 20 % de la capacidad de retención del contenedor.

A **B**

Figura 8.Sistema de riego de los cuatro tratamientos con sustrato, en donde A: es el sistema de conexión entre los tinacos y las cintillas de riego y B: muestra la distribución de las cintillas de riego, dos por cada hilera de cajas.

En el caso del tratamiento de hidroponía profunda, no se usó ninguno de estos materiales, ya que se elaboró una solución nutritiva para cada una de las 16 cajas que conformaron el tratamiento (29 L por caja) (Figura 9)

Figura 9.Cajas y cubiertas para el sistema de hidroponía profunda.

Los excedentes de cada riego de los tratamientos con sustrato se recolectaron diariamente en cubetas de 3 L de capacidad, las cuales se cubrieron en la parte superior con un plástico negro, con el fin de evitar que agentes contaminantes externos, alteraran el contenido de los recipientes (Figura 10).

Figura 10. sistema de recolección de solución nutritiva drenada en los tratamientos 1,2,3 y 4.

En cuanto al manejo de la solución nutritiva, a los sistemas sin recirculación esta se aplicaba a una concentración del 100 % en cada riego una vez que se agotaba la solución del tinaco de 200 litros se preparaba una nueva. Para el caso de los sistemas con recirculación, cada que se agotaba la solución del tinaco de 200 litros, se preparaban 160 litros de una nueva solución al 100 % de concentración y se añadían 40 litros de la solución capturada en los drenajes para completar los 200 litros de solución.

En el siguiente cuadro se observa la cantidad de las fuentes de fertilizantes respectivamente utilizadas.

Cuadro 1. Cantidades de fertilizantes utilizados en los sistemas con y sin recirculación por cada 200 litros de solución nutritiva.

Fuentes de nutrientes	Solución nutritiva	
	Tratamientos 1 y 2 al 80% en 160 L	**Tratamiento 3 y 4 al 100% en 200 L**
Nitrato de calcio (15,5-00-00+ 26,5 CaO	206,4 g	258 g
Sulfato de potasio (00-00-50 + 18,4 S)	96,4 g	120,5 g
Ácido fosfórico (P al 46%)	25,87 ml	32,34 ml
Sulfato de magnesio (00-00-00 +9,8 MgO + 12,9 S)	108,84 g	136,05 g
Sulfato ferroso ($FeSO_4$)	1,21 g	1,52 g
Ácido bórico (H_3BO_3)	0,57 g	0,72 g
Sulfato de manganeso ($MnSO_4$)	0,38 g	0,48 g
Sulfato de cobre ($CuSO_4$)	0,048 g	0,06 g
Sulfato de zinc ($ZnSO_4$)	0,038 g	0,048 g

En el caso del sistema de hidroponía profunda para cada caja se formuló una solución nutritiva inicial de 29 L con las siguientes concentraciones ($mg \cdot L^{-1}$): N=200, P= 40, K= 250, Mg= 40, Ca= 280, S=150, Fe=1, B=0.5, Zn=0.1, Cu= 0.1), flotando en ésta, se colocaron placas de unicel (poliestireno expandido) de dimensiones (50 cm de largo, 30 cm de ancho) con dos perforaciones donde se ubicaron las plántulas trasplantadas (Figura 11).

Figura 11. Establecimiento del tratamiento de hidroponía profunda.

Para mantener el flujo de oxigeno constante en la solución, se usó una bomba de acuario con dos salidas marca RESUN AIR- PUMP AC 9602 por cada dos cajas, dando un total de 8 bombas para ese tratamiento.

Se inició con una solución nutritiva de conductividad eléctrica de 2.2 y un pH de 5.8. De manera diaria y en horas de la mañana, se reponía el agua evapotranspirada del día anterior, seguidamente con ayuda de un potenciómetro portátil modelo HI98130 marca HANNA se medía el pH y la CE y, cuando el pH se desajustaba; es decir, cuando la solución nutritiva se salía del rango deseable (5.5 – 6.5) se aplicaba ácido sulfúrico diluido para regularlo.

Adicionalmente, cada que la CE bajaba de 1.7 $dS \cdot cm^{-2}$, se añadían proporcionalmente nutrientes para llevarla a valores de 2.5 a 3. Se reponía un 70% de la cantidad de N, P y K añadida a la solución inicial, ya que se considera que son los elementos que más rápido se absorben por la planta y, por lo tanto, los que más rápido desaparecen de la solución. Mientras que, para Ca, Mg, y S, cuya absorción por las plantas es más lenta, se reponía el 30% de la cantidad aportada inicialmente. Asimismo, semanalmente se añadía 1 $mg \cdot L^{-1}$ de sulfato ferroso a la solución nutritiva presente en cada caja para compensar su paulatina precipitación.

3.8 Conducción del cultivo

El trasplante se realizó el 21 de agosto del 2019. con plantas de 41 días de edad, se sembraron dos plantas por contenedor (caja), dejando una distancia entre ellas de 35 cm y 25 cm entre hileras, para así lograr un total de 8 $plantas \cdot m^{-2}$ de jitomate (Figura 12).

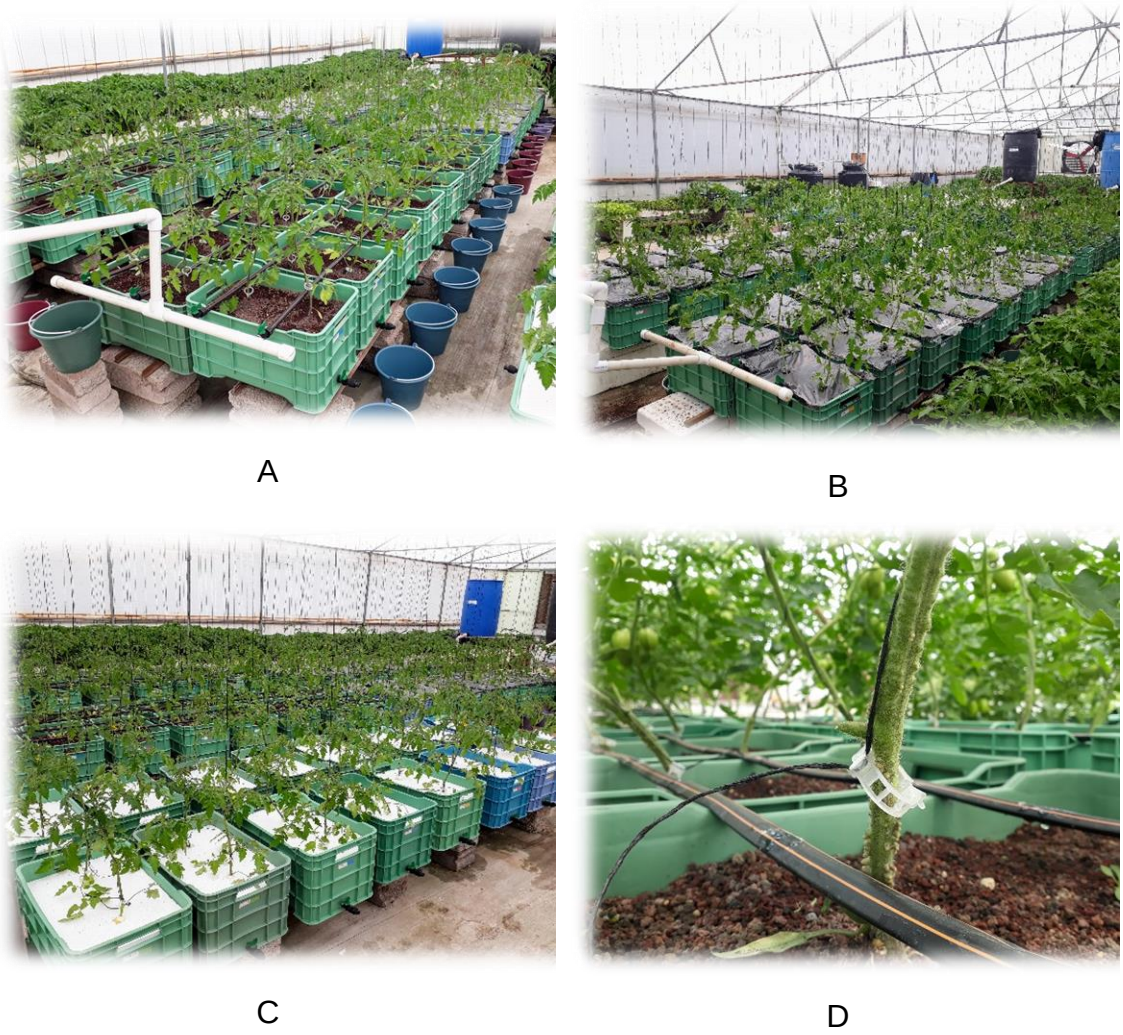
A **B**

Figura 12.Trasplante en los tratamientos sin acolchar; B: trasplante en los tratamientos con acolchado.

En el caso de las plantas del tratamiento de hidroponía profunda, se lavaron las raíces con agua, procurando que quedaran libres de sustrato y colocándolas sobre los agujeros de la placa de unicel. Seguidamente, se envolvió sobre la base del tallo algodón, con el propósito de mantener la planta fija en su puesto y, finalmente se realizó el llenado de las cajas con la solución nutritiva (Figura 13).

Figura 13. Lavado de raíces y trasplante del tratamiento de hidroponía profunda.

Finalizando la etapa de trasplante, a los 42 días después de la siembra, se empleó el sistema de conducción tipo holandés, el cual consistió en utilizar una rafia por tallo sujeta en un extremo al cable o cargador y el otro a la base del tallo mediante un anillo de plástico, a medida que la planta iba creciendo se fue enredando la rafia a lo largo del tallo (Figura 14).



A B C D

Figura 14.Sistema de tutorado tipo holandés en los distintos tratamientos (A, B y C.) D: anillo plástico para tutorar.

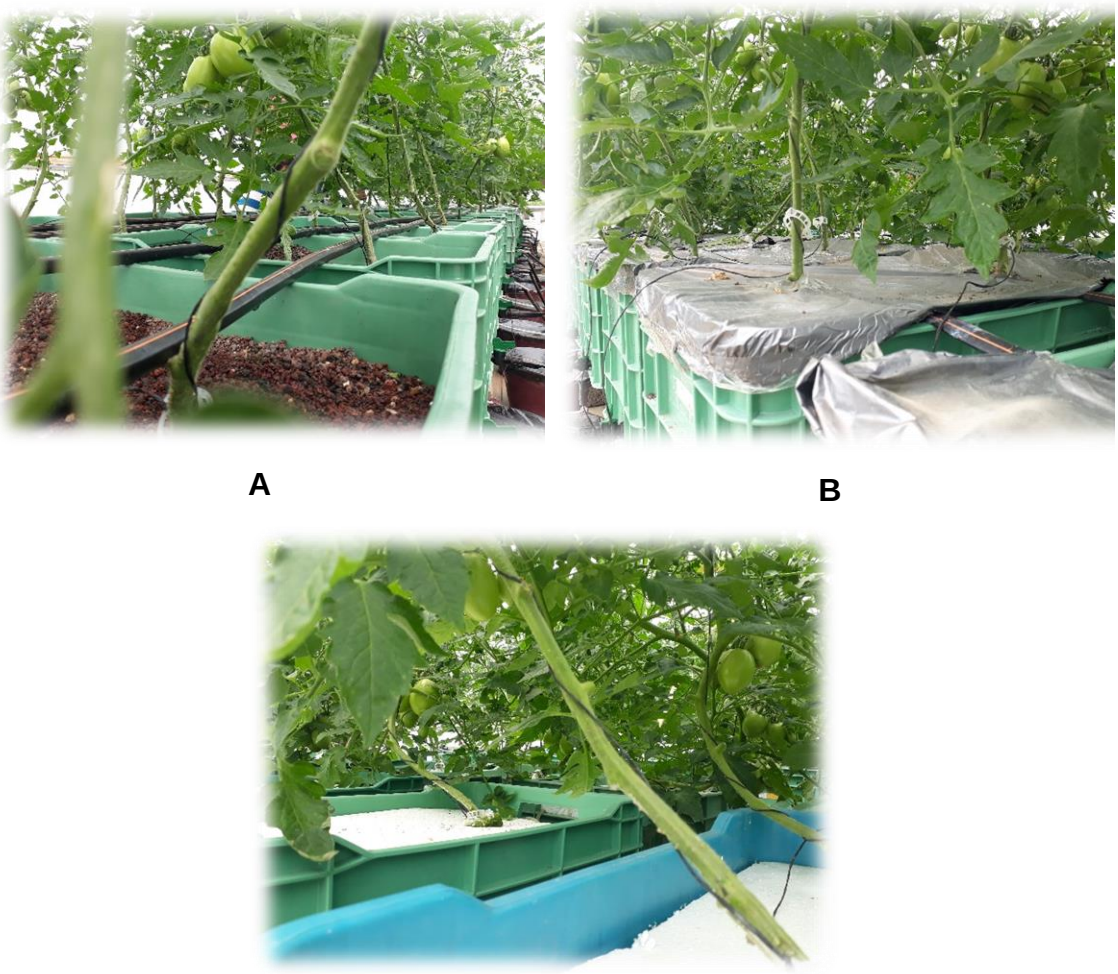
Con el fin de hacer vibrar las plantas y con ello liberar el polen al ambiente para facilitar la polinización se daban golpes sobre las rafias del tutoreo en horas de la mañana.

Los desbrotes o deschupones se iniciaron desde los 65 días después de la siembra y se hacían una a dos veces por semana. El despunte (eliminación de la yema terminal) se realizó a dos hojas por encima del tercer racimo entre los 75 y 85 días después de la siembra (Figura 15).

A **B**

Figura 15. (A) Despunte o poda apical dos hojas por encima del tercer racimo en todos los tratamientos y (B) Presencia y eliminación de los brotes laterales o chupones.

La poda de hojas o deshojado se realizó a los 73 días después de la siembra, esta práctica consistió en remover las hojas senescentes inferiores (hojas viejas o dañadas) por debajo del primer racimo que van madurando, dejando este al descubierto (Figura 16).



A **B**

C

Figura 16. A. Deshoje en los tratamientos sin acolchado; B: Deshoje en los tratamientos con acolchado y C: Deshoje en el tratamiento de hidroponía profunda.

3.8.1 Manejo de plagas y enfermedades.

Durante todo el ciclo del jitomate hubo presencia e incidencia de plagas y enfermedades. Sin embargo, gracias a las condiciones del invernadero el impacto de estas sobre el cultivo fue mínima.

La presencia de la malla antiafidos en las ventanas laterales actuó como método preventivo, ya que funcionaron como una barrera física que impidieron el paso de insectos plagas más grandes.

En etapa de semillero y después del trasplante se observó la presencia de Trips (*Frankliniella occidentalis),* mosca blanca *(Trialeurodes vaporariorum)* y perforador de fruto *(Spodoptera spp.)(*Figura 17) *,* en el primer caso, para su control se aplicó Spinosad, (insecticida de baja toxicidad) con dosis de 1,5 $g \cdot L^{-1}$, para el control de mosca blanca confidor (I.A Imidacloprid al 0.1%) y como hubo poca afectación y presencia de la larva de lepidóptero (*Spodoptera sp*.), no hubo la necesidad de aplicar insecticida, sin embargo, su control se realizó de manera manual.

Figura 17. Larva del lepidóptero *Spodoptera spp.*

Igualmente, se observó la presencia e incidencia de enfermedades entre ellas: cenicilla (*Leveillula taurica*) (Figura 18), tizón temprano (*Alternaria solani*) y tizón tardío (*Phytophtora infestans*). Para su debido manejo, se usó REVUS 250 SC, para control de cenicilla, por su baja incidencia se aplicó Cupravit mix (I.A oxicloruro de cobre 39% + Mancozeb 30%) para tizón temprano y para prevenir tizón tardío, se realizó la rotación de productos como Rodomiel Gold Bravo SC (Metalaxil-M + clorotalonil), con GARLIX ORG, que contiene compuestos azufrados del extracto de ajo (*Allium sativum*).

Figura 18. Incidencia de cenicilla (*Leveillula taurica*) sobre el tejido foliar de la planta de jitomate.

Cabe mencionar que, la aplicación de estos productos agrícolas no se realizó periódicamente, únicamente se aplicaron al momento de observar los signos de cada plaga y enfermedad sobre la planta.

3.8.2 Condiciones del experimento

Mediante el instrumento Datalogger portátil Marca EXTECH modelo RHT10, se registraron cada 10 minutos, la temperatura y la humedad relativa del aire, durante el periodo julio- diciembre (Figura 19).

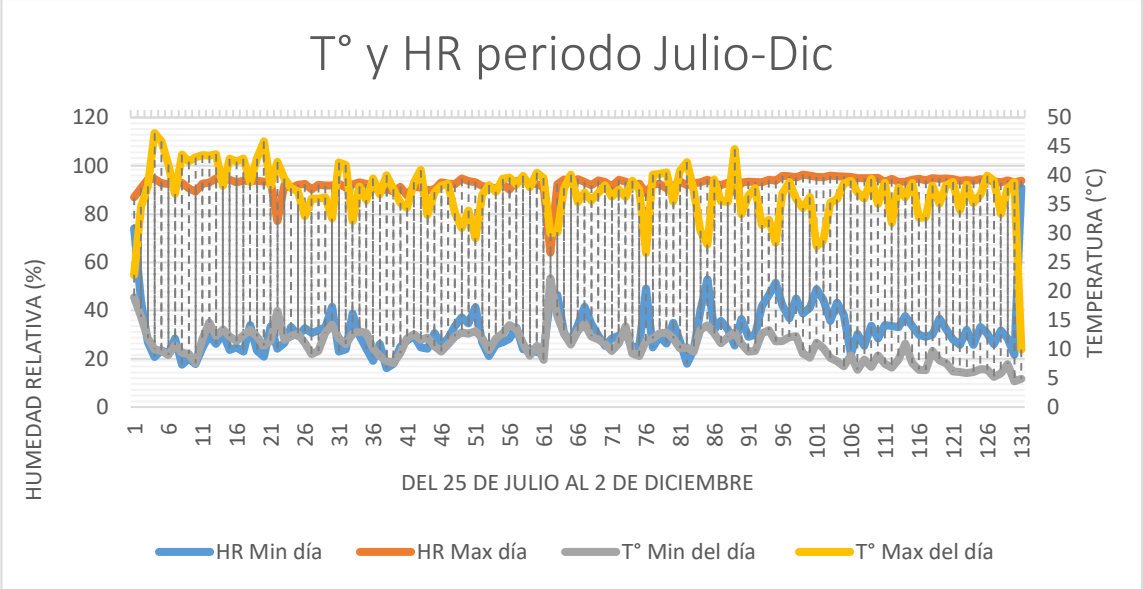


Figura 19.Condiciones de temperatura y humedad relativa a lo largo del experimento.

3.9 Variables evaluadas

3.9.1 Caracteres morfológicos

- **Diámetro de tallo a los 73 y 108 dds (mm):** la medida se realizó en la segunda hoja por encima del primer racimo. Para ello, se usó un vernier digital (± 0,01 mm).
- **Altura de planta a los 73 y 108 dds (cm).** Se hizo con cinta métrica. Se midió desde la base del tallo hasta la segunda hoja por encima de la tercera inflorescencia del tallo principal.
- **Área foliar por planta a los 90 y 120 dds (cm^2):** Se realizó el dibujo del contorno de las hojas de tres plantas representativas por unidad experimental, que, posteriormente se llevaron a un integrador de área foliar, LICOR-300 Lincon. Se registró el largo, ancho y área de cada hoja. Con los datos del producto de largo por ancho y área por hoja, se generó un factor (regresión

lineal) con el que se calculó el área foliar en los demás muestreos de modo que sólo con medir el largo y ancho de cada hoja se estimó su área.

3.9.2 Variables de peso seco por órgano por planta

Se realizaron dos muestreos destructivos a los 90 y 134 dds; para ello, se tomó una planta por unidad experimental, las muestras se llevaron al laboratorio, donde se separaron los diferentes órganos y se envolvieron en bolsas de papel, para posteriormente colocarlos en una estufa a 70 °C.

- **Peso seco de hoja por planta (g):** se hizo una separación de las hojas del tallo y para su secado se utilizó una estufa a 70 °C hasta lograr peso constante; el peso se determinó con el apoyo de una balanza analítica.
- **Peso seco de tallo por plata (g):** los tallos fueron secados en una estufa a 70 °C hasta peso constante, y el peso se determinó con la ayuda de una balanza analítica.
- **Peso seco de frutos por planta (g):** una vez separados los frutos de las plantas, se secaron en una estufa a 70 °C hasta que llegaron a peso constante, y con la ayuda de una balanza analítica se determinó su peso seco.
- **Peso seco de la raíz:** De cada planta muestreada se lavó la raíz con agua limpia hasta que estuviera libre de partículas de sustrato, una vez limpia fue sometida al proceso de secado en estufa a 70 °C hasta llegar a peso constante, el cual se cuantificó con una balanza analítica.
- **Peso seco total por planta (g):** se obtuvo sumando el peso seco de raíz, tallo, hojas y frutos de las plantas de cada unidad experimental

3.9.3 Rendimiento y sus componentes

Para las variables del rendimiento, se evaluaron en promedio 6 plantas por unidad experimental, es decir 24 plantas por tratamiento.

En total se realizaron siete cortes entre el 19 de octubre (59 días después del trasplante) y 30 de noviembre del 2019 (101 después del trasplante). Cabe

destacar que los frutos se cortaron en grado de madurez 4 (entre el 30 y 60 % de la superficie del fruto muestra color rosa o rojo), y se determinaron las siguientes variables:

- **Número de frutos (frutos por planta):** se sumaron todos los frutos cosechados en cada corte para cada unidad experimental.
- **Peso medio de frutos (g).** Se calculó dividiendo el peso total de los frutos cosechados entre el número total de frutos cosechados.
- **Rendimiento (kg·planta^{-1}):** se obtuvo con la suma del peso total de frutos cosechados por planta.
- **Índice de cosecha (IC):** se obtuvo dividiendo el peso seco de los frutos por planta entre el peso seco total de la planta.

$$IC = \frac{Peso\ seco\ de\ frutos\ por\ planta\ (g)}{peso\ seco\ de\ la\ planta\ \ (g)}$$

3.9.4 Agua (L) y macronutrientes (g aportados en el ciclo por planta).

Conocida la concentración de cada elemento en cada una de las formulaciones aplicadas y el gasto en litros de agua que se le aportó a cada unidad experimental durante todo el ciclo del cultivo, se procedió a calcular la cantidad aportada de cada macronutriente durante todo el ciclo de trasplante a fin de cosecha para cada unidad experimental.

3.9.5 Macronutrientes absorbidos por el tejido vegetal (N, P, K, Ca, S) (g/planta):

Esta variable se midió a los 90 y 134 dds, donde se hicieron análisis químicos del tejido de una planta representativa de cada unidad experimental. El procedimiento fue el siguiente:

El material vegetal fue cortado y secado de manera individual en una estufa a 70°C, todo el material vegetal fue separado en dos categorías para el proceso de molienda: estructuras vegetativas (hojas, tallo, raíz) y estructuras reproductivas (frutos). La molienda se realizó con un molino WILEY modelo 4 de 110 VAC. Una vez obtenido el polvo se almacenaron en frascos de vidrio transparentes para su posterior digestión.

Para la determinación nutrimental se tomó una muestra de 0.5 g de peso seco, la cual fue sometida a una digestión húmeda (ácido sulfúrico y ácido perclórico en relación 4:1), se agregaron 4 ml de esta mezcla y 2 ml de agua oxigenada al 30 %; el material se quedó sobre una plancha caliente hasta que el extracto cambió a un color claro. El extracto se aforó a 50 ml con agua destilada y a partir de éste se realizaron las determinaciones de N, P, K, Ca y Mg (Alcántar y Sandoval, 1999).

La determinación de nitrógeno total se realizó por el método de microkjendahl (Chapman y Pratt, 1973). El contenido de NO_3^- fue realizado por medio de la adición del reactivo Devarda. El contenido de fosforo se determinó por el método del amarillo de Vanadato-molibdato (Chapman y Pratt, 1973) (Figura 20), leyendo en un espectrofotómetro GENESYS 10 UV a una absorbancia de 420 nm. El contenido de potasio se determinó por medio del método del espectrofotómetro de flama desarrollado por el U.S Salinity Laboratory Staff, 1954. Los contenidos de calcio y magnesio fueron determinados por el método volumétrico del versenato desarrollado por Cheng y Bray en 1951; Cheng y Kurtz en 1960.

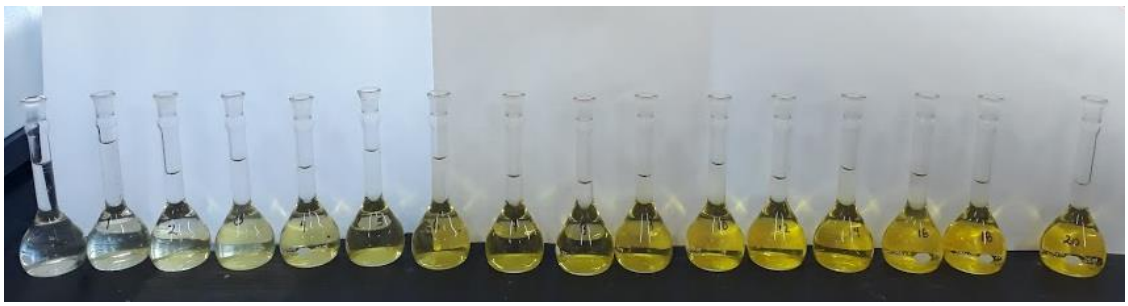


Figura 20. Determinación de P con el método del amarillo de Vanadato-molibdato (Chapman y Pratt, 1973).

Macronutrientes lixiviados en los drenajes (g/planta):

Por cada unidad experimental se tomaron muestras representativas, que posteriormente se trasladaron al Laboratorio De Ecología del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se determinaron los macronutrientes de la solución nutritiva drenada a los 30, 60 y 90 días después del trasplante.

3.9.6 Macronutrientes lixiviados (g por planta en el ciclo) contenidos en los drenajes (g):

De los drenajes de cada unidad experimental se hicieron muestreos de cada tratamiento con y sin recirculación y el sistema de hidroponía profunda; donde se colectó y mezcló la solución drenada de las cuatro cajas que componen la unidad experimental, obteniendo de ellas una muestra compuesta de 25 ml que fueron depositadas y almacenados en frascos de color ámbar, en total se hicieron tres determinaciones (a los 30, 60 y 90 días después del trasplante) durante el ciclo de cultivo. Las muestras generales por tratamiento fueron de 750 ml de solución drenada, que posteriormente fueron llevadas al laboratorio para su análisis (determinación de N, P, K, Ca, Mg y S). Se emplearon las mismas metodologías que para la determinación de sus concentraciones en el tejido vegetal. En el caso del nitrógeno se usó el método de ácido Nitrofenoldisulfónico desarrollado por Harper en 1954 para cuantificar nitratos.

Con los resultados de estos análisis y conociendo la cantidad de litros de solución drenada en todo el ciclo de cultivo, se estimó la cantidad de cada uno de los macronutrientes drenados durante todo el ciclo.

3.9.7 Macronutrientes solubilizados o liberados del sustrato (mg/L de sustrato en el ciclo):

Para determinar esta variable, al final del ciclo de cultivo, por unidad experimental, se tomaron muestras de arena de tezontle rojo a dos diferentes niveles del contenedor, la primera a una profundidad de 0 a 10 cm, en la cual se colectó y mezcló el sustrato de las cuatro cajas que componen la unidad experimental, obteniendo de ella una muestra compuesta de 1 kg y el segundo entre los 10 y 23 cm de profundidad se realizó el mismo procedimiento anteriormente mencionado.

Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Ecología, del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo y secadas en una estufa a 70 °C, hasta llegar a un peso constante, el cual se cuantificó con una balanza analítica. Posteriormente, se pesaron 400 g de cada muestra, las cuales fueron colocadas en un embudo de cerámica con extractor donde se saturó con 150 ml de agua destilada y desionizada, dejando reposar durante dos horas; seguidamente, se extrajo la solución drenada para luego determinar el contenido de N, P, K, Ca y Mg en donde se emplearon las mismas metodologías que en apartado anterior para la determinación de sus concentraciones en el tejido vegetal. Con estos datos se estimó la cantidad de macronutrientes presentes en el sustrato de forma soluble al final del ciclo de cultivo.

A B

Figura 21. Muestreo en sustrato de tezontle a dos niveles. (A) 0-10 cm y (B) 10-23 cm.

Variables relacionadas con la eficiencia de uso de agua y nutrientes.

3.9.8 Litros de agua y gramos de macronutrimentos gastados por kilogramo de fruto producido:

En función del gasto de agua y del rendimiento final, se estimó la cantidad de litros de agua y los gramos de cada macronutrimento requeridos por la planta para producir un kilogramo de fruto en peso fresco para cada uno de los tratamientos evaluados.

3.9.9 Ahorro de agua y fertilizantes para cada tratamiento (%).

Tomando como testigo al tratamiento sin recirculación de la solución nutritiva sin acolchado se estimó el porcentaje de ahorro que se puede lograr a lo largo del ciclo de cultivo según el tratamiento escogido.

3.10 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos de los caracteres morfológicos, indicadores de crecimiento, variables de rendimiento y sus componentes y, variables de dinámica nutrimental, se sometieron a análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2002).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracteres morfológicos

De acuerdo a los datos del Cuadro de análisis de varianza para las variables morfológicas (Cuadro 2), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para las variables de altura de planta y diámetro de tallo medidas a los 73 y 108 días después de la siembra (dds), así como también para el área foliar por planta medida a los 90 y 120 dds.

Cuadro 2. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables morfológicas durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Fuente de variación	Grados de libertad	Días después de la siembra	
		73	108
		--------Altura de planta ---------	
Tratamientos	4	320.62 ^{S}	310.37 ^{S}
Bloque	3	19.25	18.66
Error	12	8.62	9.7
Total	19		
CV(%)		3.2	3.3
Media (cm)		90	92
		--------Diámetro del tallo ----------	
Tratamientos	4	4.67 ^{S}	5.05 ^{S}
Bloque	3	0.98	0.33
Error	12	0.27	0.25
Total	19		
CV(%)		5.27	4.6
Media (mm)		9.95	10.7
		90	120
		-----Área foliar por planta-----	
Tratamientos	4	225348 ^{S}	253214 ^{S}
Bloque	3	10385	42738
Error	12	16770	39270
Total	19		
CV (%)		4.2	4.8
Media (cm^2)		3071	4111

NS = no significativo. S = Significativo a una $p \leq 0.05$; AS = altamente significativo a una $p \leq 0.001$. CV: Coeficiente de variación.

En las pruebas de comparación de medias (Cuadro 3), se destaca que las plantas del tratamiento de hidroponía profunda, tanto a los 73 como a los 108 dds tuvieron una altura significativamente menor que las de los demás sistemas hidropónicos estudiados que se comportaron de una manera muy similar entre ellos. La diferencia en altura fue de una magnitud de aproximadamente 20 cm, lo que representa un 21 % de reducción.

También las plantas manejadas bajo el sistema de hidroponía profunda presentaron el mayor diámetro de tallo resultando en diferencias significativas con respecto a las demás modalidades hidropónicas estudiadas, excepto la del sistema abierto sin recirculación de la solución nutritiva con acolchado.

Por último, se encontró el área foliar por planta disminuyó significativamente a los 90 dds con el sistema con recirculación de la solución nutritiva sin acochado respecto a los demás tratamientos, tendencia que se mantuvo hasta los 120 dds, aunque estadísticamente ya sólo difirió del sistema de hidroponía profunda (que fue el tratamiento de mayor área foliar por planta) y el sistema abierto sin acolchado.

Cuadro 3. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables morfológicas durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Días después de la siembra	
	73	108
	----------Altura de planta (cm)----------	
Con recirculación con acolchado	94.5 a	96.0 a
Con recirculación sin acolchado	93.7 a	95.5 a
Sin recirculación con acolchado	94.0 a	96.0 a
Sin recirculación sin acolchado	94.7 a	96.2 a
Hidroponía profunda	74.2 b	76.2 b
DMSH	6.6	7.0
	----------Diámetro de tallo (mm)----------	
Con recirculación con acolchado	10.2 ab	10.7 bc
Con recirculación sin acolchado	8.5 c	9.5 d
Sin recirculación con acolchado	10.5 a	11.2 ab
Sin recirculación sin acolchado	9.2 bc	9.7 dc
Hidroponía profunda	11.2 a	12.2 a
DMSH	1.2	1.12
	90	120
	----------Área foliar ($cm^2 \cdot planta^{-1}$)----------	
Con recirculación con acolchado	3100 a	4139 ab
Con recirculación sin acolchado	2688 b	3718 b
Sin recirculación con acolchado	3059 a	4049 ab
Sin recirculación sin acolchado	3178 a	4283 a
Hidroponía profunda	3329 a	4366 a
DMSH	292	447

Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DMS=Diferencia mínima significativa.

La menor altura de planta con el sistema de hidroponía profunda probablemente se debió a que el interior del dosel de plantas estuvo más iluminado debido a la reflexión difusa ocasionada por los paneles de unicel de color blanco que cubrían la solución nutritiva. Al respecto varios autores como Oriolani *et al. (*1979); Thompson *et al. (*2009); Vargas *et al.* 2010) mencionan que, la coloración blanca de plástico para acolchar refleja parte de la luz solar y aumenta la radiación fotosintética que llega a la planta; estas condiciones de luz reducen la elongación celular reduciendo la altura.

Seguramente esta reflexión también provocó cambios en la calidad de la luz en el interior a favor de una mayor proporción de luz roja en relación al rojo lejano provocando la reducción en altura.

De acuerdo con varios autores (Taiz y Zeiger, 2006; Hopkins y Hüner, 2009; Jishi, 2018), en condiciones naturales dentro de un dosel donde las plantas se alcanzan a sombrear mutuamente, la radiación es deficiente en luz azul y roja, porque estas longitudes de onda son absorbidas en las hojas superiores por la clorofila en el proceso de fotosíntesis, no así la luz verde y la radiación en el rojo lejano que son reflejadas por ellas y penetran más en el dosel. Las plantas usan los fitocromos y el criptocromo para detectar estos cambios en cantidad y de calidad de luz provocando respuestas morfogenéticas como la elongación de los entrenudos.

Como lo mencionan Craver y López (2016), en el interior del dosel, cuando la luz azul se combina con luz roja, o cuando la proporción de luz roja en relación a roja lejana es alta, se reduce la elongación de los entrenudos disminuyendo la altura de las plántulas.

Asimismo, el sistema de hidroponía profunda y los sistemas con y sin recirculación con acolchado fueron estadísticamente mayores en diámetro de tallo respecto a los que no tenían acolchado, lo cual puede estar relacionado a que éste impide la evaporación en la superficie del sustrato proporcionando condiciones de humedad más elevadas para la raíz, menor estrés al mantenerse una conductividad eléctrica más constante en la rizósfera por medio del lavado adecuado de sales en el sustrato y menor presión osmótica en el sustrato (FAO, 2013), lo que favoreció la absorción de más agua por las células del tallo haciéndolas incrementar en volumen (Taiz y Zeiger, 2006).

También la mayor área foliar en el tratamiento de hidroponía profunda seguramente se relaciona con las mejores condiciones hídricas que mantuvo la raíz a lo largo del ciclo de cultivo. Resultado que es similar al encontrado por Sánchez *et al*. (2014).

4.2 Variables de peso seco por órganos y total

De acuerdo a los datos de análisis de varianza para las variables de peso seco por órganos y total (Cuadro 4), se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el peso seco de hoja, tallo, fruto y total de planta a los 93 dds, así como también para el peso seco de hojas a los 134 dds.

Cuadro 4. Cuadrados medios y niveles de significancia para variables de peso seco por órganos y total durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Muestreo (dds)	Fuente de variación	Grados de libertad	Materia seca (g)				
			Raíz	Hojas	Tallo	Frutos	Total
93	Tratamientos	4	19.2^{NS}	151.1^{S}	20.3^{S}	26.0^{S}	452.5^{S}
	Bloque	3	13.9	26.3	0.25	7.14	106.6
	Error	12	8.2	11.8	4.34	6.6	47.3
	Total	19					
	CV(%)		21.8	11.36	18.9	10.3	8.6
	Media		13.2	30.3	10.9	24.8	79.4
134	Tratamientos	4	43.4^{NS}	115.9^{S}	6.8^{NS}	265.9^{NS}	556.6^{NS}
	Bloque	3	31.2	55.3	0.4	200.8	387.5
	Error	12	18.4	23.5	10.1	199.5	222.7
	Total	19					
	CV(%)		21.7	11.5	19.5	10.6	7.8
	Media		19.7	42.0	16.2	132.2	190.5

Dds= días después de la siembra. NS = no significativo. S = Significativo a una $p \leq 0.05$; AS = altamente significativo a una $p \leq 0.001$. CV: Coeficiente de variación.

En la prueba de comparación de medias de las variables de peso seco por órganos y total por planta medidas a los 93 dds (Cuadro 5) se destaca la siguiente:

1. No hay diferencias significativas entre tratamientos para el peso seco de raíz.
2. Las plantas bajo el sistema de hidroponía profunda presentan el mayor peso seco de hojas, difiriendo estadísticamente de los demás tratamientos a excepción del sistema hidropónico sin recirculación de la solución nutritiva combinado con acolchado del sustrato.

3. El peso seco del tallo fue mayor en las plantas bajo el tratamiento sin recirculación con acolchado, alcanzando a diferir estadísticamente de los sistemas con recirculación sin acolchado y del de hidroponía profunda.
4. También el peso seco de frutos fue mayor en las plantas del sistema sin recirculación con acolchado, pero sólo tuvo diferencias significativas con el sistema con recirculación sin acolchado.
5. Como consecuencia de lo anterior, el peso seco total por planta fue mayor para el tratamiento sin recirculación y con acolchado, el cual alcanzó a diferir estadísticamente de los tratamientos con recirculación y sin acolchado y sin recirculación sin acolchado que presentaron los menores valores.

A los 134 dds las diferencias que había entre tratamientos para las distintas variables de peso seco se desvanecieron. Sólo el peso seco de las hojas tuvo una variación numérica considerable, desde 50 g por planta en el tratamiento de hidroponía profunda hasta 35.5 g por planta (29 % menos) para las plantas bajo el sistema con recirculación y sin acolchado, diferencia que no alcanzó a ser estadísticamente significativa.

La observación cuidadosa de los resultados mostrados en el Cuadro 5 sugieren que el sistema hidropónico con recirculación de la solución nutritiva sin acolchado de la superficie del tezontle fue uno de los más afectados en cuanto a la ganancia de peso seco, al menos hasta los 93 dds. El desequilibrio paulatino de la nutrición (Nakano *et al*., 2010), la mayor cantidad de precipitados de nutrientes provocada por la mayor evaporación de agua en la rugosa superficie del tezontle (Cabañas, 2020) y la consecuente alteración más pronunciada de la conductividad eléctrica en la zona de la raíz (Tüzel *et al*., 2009; Massa *et al*., 2010), pueden ser las principales causas de estos resultados.

Por el contrario, los tratamientos con mayores valores en peso seco correspondieron a aquellos en los que las condiciones hídricas, nutricionales y

de oscilación en la conductividad eléctrica se mantienen más estables (sistema sin recirculación con acolchado y sistema de hidroponía profunda).

Cuadro 5. Comparaciones de medias para variables de índice de crecimiento durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Muestreo (dds)	Tratamientos	Materia seca (g)				
		Raíz	Hojas	Tallo	Frutos	Total
93	Con recirculación con acolchado	13.5 a	27.3 bc	11.3 ab	25.9 ab	78.1 abc
	Con recirculación sin acolchado	11.4 a	23.4 c	8.9 b	20.7 b	64.5 c
	Sin recirculación con acolchado	16.6 a	34.2 ab	14.7 a	27.6 a	93.2 a
	Sin recirculación sin acolchado	13.2 a	27.8 bc	10.1 ab	25.3 ab	76.4 bc
	Hidroponía profunda	11.2 a	38.9 a	9.8 b	24.8 ab	84.8 ab
	DMSH	6.4	7.7	4.7	5.8	12.1
134	Con recirculación con acolchado	20.2 a	40.2 a	16.9 a	128.9 a	206.3 a
	Con recirculación sin acolchado	17.0 a	35.5 a	15.7 a	120.5 a	188.7 a
	Sin recirculación con acolchado	24.9 a	40.4 a	18.2 a	141.6 a	225.1 a
	Sin recirculación sin acolchado	19.7 a	43.7 a	15.4 a	137.7 a	216.6 a
	Hidroponía profunda	16.7 a	50.0 a	15.0 a	132.4 a	214.2 a
	DMSH	9.6	18.3	7.1	31.8	36.6

dds= días después de la siembra. Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DMS=Diferencia mínima significativa.

De acuerdo al cuadro 5, la primera medición que se realizó a los 93 dds, se observa la distribución de materia seca en órganos vegetativos como hojas, raíces y tallos donde representaron entre un 35 a 45%, 13 a 17% y 11 a 15% respectivamente, mientras que los frutos solo fueron del 29 al 33% del total. Como era de esperar, esta distribución de materia seca cambió durante el desarrollo del cultivo, donde a los 134 dds el fruto figuró como el órgano con mayor peso seco entre un 62 a 64% (Figura 22).

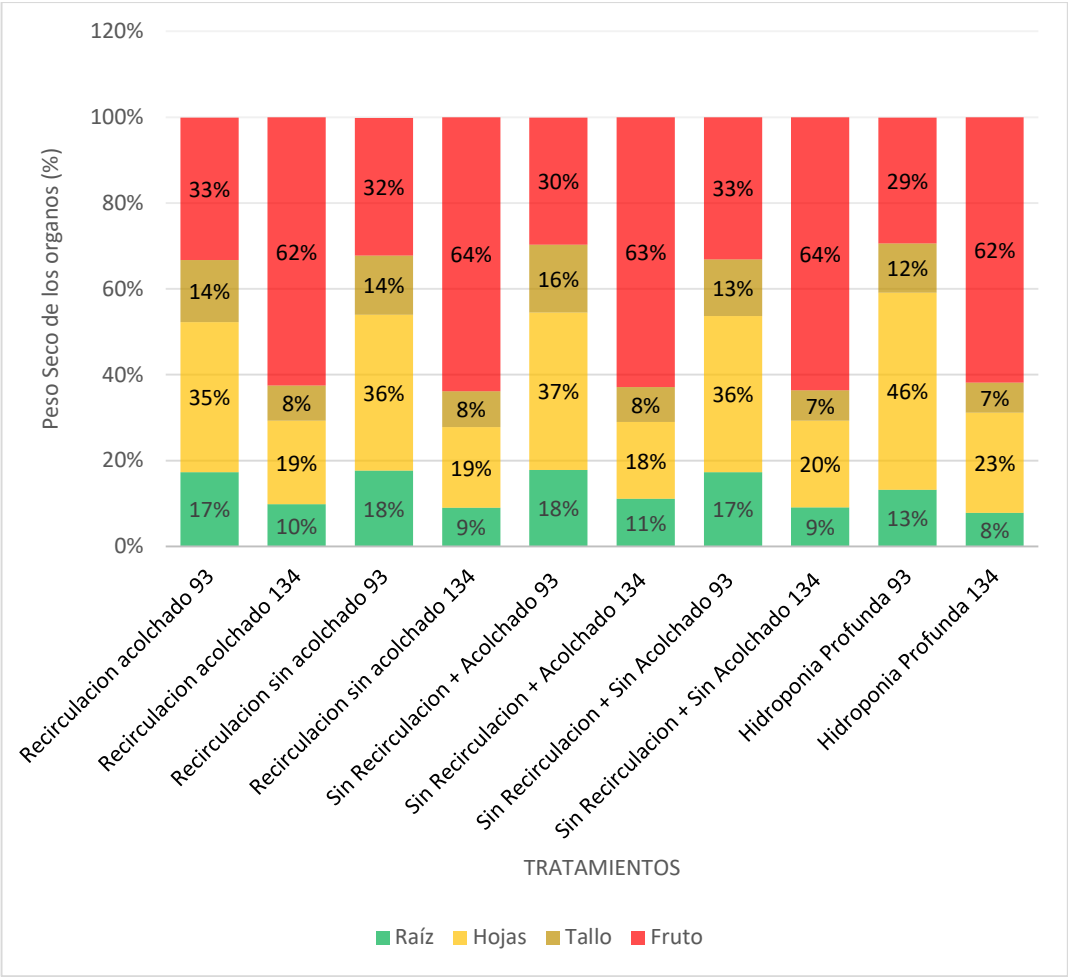


Figura 22. Peso seco de los órganos a los 93 y 134 dds (%)

4.3 Rendimiento y sus componentes

Respecto a las variables de rendimiento por planta y sus componentes, el análisis de varianza, indica efectos significativos de los sistemas hidropónicos evaluados sobre el peso medio por fruto y el rendimiento por planta, no así para el índice de cosecha ni para el número de frutos por planta.

Cuadro 6. Cuadrados medios y niveles de significancia para el rendimiento por planta y sus componentes durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Fuente de variación	Grados de libertad	Índice de cosecha	Número de frutos por planta	Peso Medio de Fruto (g)	Rendimiento por planta ($g \cdot pl^{-1}$)
Tratamientos	4	0.002 ^{NS}	3.5 ^{NS}	226.0 ^{S}	198550.5 ^{S}
Bloque	3	0.0005	2.4	90.3	82304.1
Error	12	0.001	3.1	20.7	52583.3
Total	19				
CV(%)		5.9	9.0	3.8	9.9
Media		0.61	19.5	118.3	2308.8

NS = no significativo. S = Significativo a una $p \leq 0.05$; AS = altamente significativo a una $p \leq 0.001$. CV: Coeficiente de variación.

La prueba de comparación de medias (Cuadro 7), muestra que las plantas manejadas con el sistema de hidroponía profunda tuvieron frutos significativamente más pesados que las del resto de los sistemas probados. Este mayor peso de fruto determinó también un mayor rendimiento por planta en el sistema de hidroponía profunda; sin embargo, en este último caso sólo alcanzó a diferir estadísticamente de las plantas bajo el sistema de recirculación de la solución nutritiva sin acolchado, que tuvo el menor valor teniendo una diferencia de 619 g (alrededor del 23.3%).

El mayor peso medio por fruto y el mayor rendimiento por planta con el sistema de hidroponía profunda posiblemente se deba a las mejores condiciones hídricas que tuvieron las plantas a lo largo de su ciclo de cultivo, pues al estar sumergida la raíz en una solución nutritiva oxigenada con un equilibrio iónico más estable y sin cambios bruscos en la conductividad eléctrica, no se presentó ningún estrés por falta de agua y el crecimiento tuvo lugar con menos limitaciones.

Resultados similares fueron obtenidos por Sánchez *et al*., (2014) con el sistema de hidroponía profunda respecto a otros sistemas de producción hidropónica con plantas de jitomate despuntadas a tres racimos por planta. La diferencia con respecto al presente trabajo es que el componente que contribuyó al mayor

rendimiento fue un mayor número de frutos por planta y no un mayor peso de fruto como en el presente trabajo.

Vale destacar que el rendimiento logrado con el sistema de hidroponía profunda (2658 g por planta) equivale a 21 $kg \cdot m^{-2}$, por lo que, considerando tres ciclos de cultivo por año, representan un potencial anual de 63 $kg \cdot m^{-2}$ (630 $t \cdot ha^{-1}$), más del doble que el que se puede lograr con un sistema convencional de ciclo largo con mediana tecnología en México (Castellanos y Borbón, 2009).

Cuadro 7. Comparaciones de medias para el rendimiento por planta y sus componentes durante el ciclo de cultivo de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Índice de cosecha	Número de frutos por planta	Rendimiento ($g \cdot pl^{-1}$)	Peso Medio de Fruto (g)
Con recirculación con acolchado	0.6 a	20 a	2254 ab	114 b
Con recirculación sin acolchado	0.6 a	18 a	2039 b	113 b
Sin recirculación con acolchado	0.6 a	20 a	2308 ab	114 b
Sin recirculación sin acolchado	0.6 a	19 a	2283 ab	118 b
Hidroponía profunda	0.6 a	20 a	2658 a	131 a
DMSH	0.08	3.9	516.8	10.2

Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DMS=Diferencia mínima significativa.

4.4 Consumo de agua y macronutrientes durante el ciclo de cultivo

De acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 8), hubo diferencias significativas entre los sistemas hidropónicos evaluados sobre la variable de consumo de agua por unidad de superficie (m^2).

Cuadro 8. Cuadrados medios y niveles de significancia para la variable consumo de agua por unidad de superficie de trasplante a fin de cosecha de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Grados de libertad	Consumo de agua ($L \cdot m^{-2}$)
Tratamientos	4	18037 ^{S}
Bloques	3	197
Error	12	168
Total	19	
CV(%)		2.46
Media		527

NS = no significativo. S = Significativo a una $p \leq 0.05$; AS = altamente significativo a una $p \leq 0.001$.

CV: Coeficiente de variación

La prueba de comparación de medias (Cuadro 9), indicó que el sistema hidropónico sin recirculación sin acolchado fue estadísticamente mayor al resto, presentando un gasto de 626 $L \cdot m^{-2}$ de agua. En contraste, el sistema de recirculación con acolchado tuvo el menor consumo (450 $L \cdot m^{-2}$), una diferencia de 176 $L \cdot m^{-2}$, lo que representa un ahorro del 28.1 %.

Cuadro 9. Comparación de medias de la variable consumo del agua por unidad de superficie (m^2) de trasplante a fin de cosecha de jitomate bajo diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Consumo de agua ($L \cdot m^{-2}$)
Recirculación con acolchado	450 d
Recirculación sin acolchado	514 c
Sin recirculación con acolchado	554 b
Sin recirculación sin acolchado	626 a
Hidroponía profunda	490 c
DMSH	29.2

Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DMSH=Diferencia mínima significativa honesta.

En el Cuadro 10 se puede observar que el gasto o volumen de agua consumida por planta durante el periodo de trasplante a fin de cosecha (100 días) fue de 56.2, 64.2, 69.3 y 61.3 L para cada uno de los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva combinado con y sin acolchado, e hidroponía profunda respectivamente, mientras que, para las plantas del tratamiento sin recirculación de la solución nutritiva sin acolchado, el gasto ascendió a 78.2 L. Estas diferencias se debieron a que, en los primeros tratamientos, se recirculó la

solución drenada, la cual correspondió aproximadamente a un 20 % de lo aplicado, además uno de los dos tratamientos sin recirculación poseía un acolchado a base de una película plástica plateada, que ayudaba a la conservación y retención de la humedad; finalmente en hidroponía profunda, las láminas de unicel funcionaron como barrera al evitar la evaporación del agua contenida en las cajas.

Extrapolando estos datos a una hectárea de invernadero y con el establecimiento de tres ciclos de cultivo al año, que es posible en el sistema de tres racimos por planta, se obtendría un ahorro aproximado de 1,760 m^3 de agua por el hecho de recircular la solución nutritiva drenada, lo que representa una considerable disminución en el uso de este recurso, de alrededor de 28%, lo cual se encuentra cercano a los resultados obtenidos por Sánchez *et al.* (2014), quienes en un estudio similar reportaron ahorros de 32.6 % en agua al comparar un sistema con recirculación de solución nutritiva respecto a uno sin recirculación en el cultivo de jitomate cultivado en camas rellenas con sustrato de tezontle.

En el Cuadro 10 se examina el consumo de agua y nutrientes por planta, desde el trasplante hasta el fin de la cosecha para cada uno de los tratamientos estudiados. También se observa que, el sistema de hidroponía profunda, fue al que se le aplicó menos nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (9.3, 1.6, 12.2 y 7.4 g/planta, respectivamente) en contraste con los otros sistemas. Datos por debajo de la investigación realizada por Sánchez *et al.* (2014), donde en un experimento con recirculación de solución nutritiva exhibieron gastos de macronutrientes por planta en jitomate de 9.8, 5.1, 22.5 y 15.5 g para nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, respectivamente.

Tomando en cuenta el sistema de hidroponía profunda que fue en el que menos hubo gasto de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio y considerando una densidad de población de 80,000 plantas/hectárea por ciclo de producción, los ahorros con relación a sistema sin recirculación sin acolchado (testigo) serían en el orden de 552, 123, 648, 1000, 152 kg de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y,

magnesio respectivamente por cada ciclo de cultivo (el triple si se considera por año).

En el caso del azufre, el sistema de hidroponía profunda consumiría 200 kg·ha^{-1} por hectárea más que el testigo en un ciclo de cultivo. Este incremento se debe a la constante aplicación de ácido sulfúrico y sulfato ferroso durante todo el ciclo del cultivo.

Cuadro 10 . Gasto de agua en litros y macronutrientes en gramos por planta y (m^2) de jitomate durante 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Consumo de agua (L·planta^{-1})	N	P	K	Ca	Mg	S
Recirculación con acolchado	56.2	11.2	2.2	14.0	13.7	2.3	12.6
Recirculación sin acolchado	64.2	13.2	2.6	16.5	16.2	2.6	16.1
Sin recirculación con acolchado	69.3	13.7	2.7	17.1	16.8	2.7	14.5
Sin recirculación sin acolchado	78.2	16.2	3.2	20.3	19.9	3.2	16.7
Hidroponía profunda	61.2	9.3	1.7	12.2	7.4	1.3	19.2

4.5 Macronutrientes absorbidos por planta (g·plata^{-1})

En el Cuadro 11 se exponen los resultados de los análisis químicos en relación al consumo de cada macronutriente por planta durante el periodo de trasplante a fin de cosecha.

Cuadro 11. Macronutrientes absorbidos por planta de jitomate en gramos en tejido vegetal y en porcentaje de absorción (entre paréntesis) respecto al total gastado a los 100 días después del trasplante en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	N	P	K	Ca	S
Recirculación con acolchado	4.12 (37)	1.09 (50)	5.7 (41)	1.00 (7)	0.95 (6)
Recirculación sin acolchado	4.03 (31)	0.93 (36)	5.4 (33)	0.85 (5)	0.89 (6)
Sin recirculación con acolchado	4.50 (33)	1.17 (43)	6.3 (37)	1.15 (7)	1.03 (7)
Sin recirculación sin acolchado	4.70 (29)	1.04 (32)	6.2 (31)	1.16 (6)	1.08 (6)
Hidroponía profunda	4.60 (49)	1.33 (78)	6.6 (54)	1.36 (18)	1.12 (6)

Respecto a la absorción de nitrógeno se observa un consumo similar entre las plantas de todos los tratamientos; sin embargo, las plantas bajo el sistema de hidroponía profunda tuvieron un porcentaje de absorción del 49 % del nitrógeno aportado en el ciclo, en tanto las plantas del tratamiento de hidroponía sin recirculación y acolchado apenas alcanzaron a absorber el 29 %. El sistema de recirculación con acolchado también fue más eficiente que el testigo con un porcentaje de absorción del 37 % de la aplicado a lo largo del ciclo. En cuanto a fósforo se logró un porcentaje de absorción de 78 % con el sistema de hidroponía profunda, más del doble que el testigo que absorbió apenas un 32 % de lo aplicado.

Para potasio se alcanzó un porcentaje de absorción superior al 50 % con el sistema de hidroponía profunda y apenas un 31 % en el testigo. Respecto al calcio se presentaron tasas de absorción de apenas entre el 5 y el 7 % todos los tratamientos, excepto el de hidroponía profunda con un porcentaje de 18 %. Los porcentajes de absorción de azufre fueron similares entre todos los tratamientos, oscilando entre un 6 a 7 % de lo aplicado a lo largo del ciclo.

Datos similares fueron reportados por Aragón, (2019) y Vargas-Canales *et al*. (2014) con un ligero incremento en nitrógeno, donde de manera general la

cantidad de nutrientes absorbidos por la planta fue del siguiente orden: K > N > Ca > P> S, además, las plantas manejadas con las distintas formulaciones absorbieron cantidades similares de nitrógeno y potasio, (2.6 y 3.6 en promedio respectivamente). Lo cual puede sugerir que, las plantas absorbieron estos elementos hasta abastecer su demanda con cierta independencia de la concentración externa aportada (absorción diferencial).

Independientemente del sistema, el nutrimento que se absorbió en mayor cantidad por planta fue potasio, seguido de nitrógeno y calcio, y en menor proporción fósforo y azufre, estos resultados concuerdan con los reportados en el cultivo de jitomate por Quesada y Bertsch (2013), Vargas-Canales (2014) y Aragón (2019).

Cabe señalar que los porcentajes de macronutrientes absorbidos por las plantas estuvieron dentro de los rangos de suficiencia recomendados por Guardiola y García (1990), Sánchez (2004), Jones (2005) y Peet (2005) para un crecimiento y desarrollo adecuado de las mismas.

La mayor absorción de potasio, nitrógeno y calcio respecto a los otros nutrientes posiblemente se debe a sus numerosas funciones fisiológicas que posee cada uno en los diferentes órganos de la planta. Por ejemplo, el potasio se requiere en mayor cantidad por que participa en el equilibrio eléctrico en el citoplasma y la regulación de la apertura estomática; además, juega un papel importante en la activación de reacciones enzimáticas en la fotosíntesis y respiración. En el caso del nitrógeno, ayuda sintetizar aminoácidos, formar clorofila, proteínas, enzimas, nucleótidos, ácidos nucleicos y ácidos orgánicos esenciales. El calcio participa en la estabilidad de la pared celular al formar pectatos de calcio, además, tiene el papel de regulación y permeabilidad de la membrana y la integridad estructural de la célula (León, 2001; Mia, 2015).

También, el porcentaje de minerales presente por planta en los diferentes sistemas evaluados fue de aproximadamente 10 %, lo que confirma que las plantas tuvieron disponibles los elementos necesarios para su crecimiento y

desarrollo, según lo señalado por Alcántar *et al.* (2016), quien menciona que la porción mineral presente en la materia seca del tejido vegetal debe estar entre 2 y 10 %.

Finalmente, cabe destacar que no se pudo realizar el análisis de contenido de magnesio en tejido debido a problemas con los aparatos de laboratorio y al cierre de instalaciones generado por una huelga de trabajadores administrativos y por la pandemia de Covid 19.

4.6 Macronutrientes lixiviados en los drenajes

De acuerdo al total acumulado de los análisis de los macronutrientes lixiviados en el drenaje de la solución nutritiva en los diferentes sistemas hidropónicos (Cuadro 12) se obtuvieron cantidades semejantes de pérdidas de nutrientes entre los sistemas, a excepción del sistema de hidroponía profunda donde no hay desperdicio de nutrientes por lixiviación. Cabe destacar que el nutriente que más se lixivió fue calcio, seguido por azufre, magnesio, nitrógeno potasio y en menor cantidad fosforo, lo cual concuerda con (Cabañas, 2020).

Para el caso del fósforo, presentó una mínima cantidad en el lixiviado comparado con los otros elementos. Este fenómeno posiblemente se debe a una alta precipitación del fósforo en el sustrato y por el elevado pH de la solución drenada, la cual estuvo en un rango de 7.8 a 8.2 (Baca *et al.,* 2016).

Cuadro 12. Macronutrientes drenados (g/planta de jitomate) durante 100 días de trasplante a fin de cosecha con distintos métodos de recirculación de solución nutritiva.

Tratamiento	N	P	K	Ca	Mg	S
Con recirculación y acolchado	1.1	0.046	0.548	3.092	1.348	1.59
Con recirculación sin acolchado	1.2	0.066	0.574	3.108	1.408	1.63
Sin recirculación y acolchado	1.3	0.059	0.618	3.001	1.634	1.65
Sin recirculación sin acolchado	1.3	0.070	0.662	3.100	1.645	1.61
Hidroponía profunda	0	0	0	0	0	0

El porcentaje de pérdidas por lixiviación con relación al total gastado en los tratamientos con sustrato osciló entre 8 % y 10 % para N; 2.1 a 2.2 % para P; 3.3

a 3.9 % para K; 15.6 a 22.6 para Ca; 51 a 58 % y entre 9.6 y 12.6 % para azufre. Hay que aclarar que en el caso de los sistemas con recirculación los nutrientes se recuperan al reintroducirlos en el sistema lo que significa un ahorro en fertilizantes para el productor.

Si se consideran estos datos para una hectárea de invernadero en un ciclo de producción de 100 días de trasplante a fin de cosecha, y considerando una densidad de población de 8 plantas·m^{-2}, lo recuperado de la lixiviación y recirculado en el caso del sistema con recirculación con acolchado, serían aproximadamente 88 kg de nitrógeno, 3.6 Kg de P, 44 kg de potasio, 247 kg de calcio, 108 kg de magnesio y 127 kg de azufre por ciclo de cultivo.

Según Bergstrand (2010) en un sistema hidropónico abierto de un ciclo de cultivo al año, se tiene pérdidas promedio de 850 kg de nitrógeno, 80 kg de fósforo y 850 kg de potasio por hectárea en un ciclo anual. Por lo tanto, el hacer recirculación de la solución nutritiva disminuye el costo en fertilizantes, lográndose ahorros económicos importantes.

4.7 Macronutrientes precipitados o retenidos en el sustrato

Si a la cantidad de nutrientes gastados de trasplante a fin de cosecha por planta se le resta la cantidad de nutrientes absorbidos por planta más la cantidad de nutrientes lixiviados también por planta se obtiene una estimación de los nutrientes precipitados o retenidos por el sustrato, o eventualmente volatilizados como en el caso de parte del nitrógeno, y que, en consecuencia, no fueron utilizados por las plantas.

En los Cuadros del 13 al 17 se presentan balances de las diferentes proporciones en que se distribuyeron los distintos macronutrientes (excepto el magnesio por las razones ya señaladas) proporcionados a los sistemas hidropónicos con sustrato a lo largo del ciclo de cultivo.

En el caso de hidroponía profunda no se hace este balance dado que no hay nutrientes lixiviados ni precipitados o fijados en el sustrato.

Los sistemas hidropónicos evaluados no tuvieron diferencias importantes en la distribución del nitrógeno suministrado en los sistemas con y sin recirculación combinado con o sin acolchado, lográndose determinar que, del total de nitrógeno aportado durante todo el ciclo del cultivo, entre 30 a 37% fue absorbido por las plantas, alrededor de 8 al 10 % drenó como iones solubles, y entre un 50 y 60 %, pudo haberse volatilizado, o quedado precipitado o fijado en el sustrato (Cuadro 13).

Datos similares fueron reportados por Aragón (2019), donde del total de nitrógeno aplicado, el 30 % fue absorbido por las plantas, 7.4 % fue lixiviado en el drenaje, 2.6 % se solubilizó del sustrato y el 60 % restante no se logró determinar su ubicación. Sin embargo, Pineda *et al.* (2011) en jitomate, encontraron que a los 74 días después del trasplante el 80 % del N total aplicado había sido absorbido por las plantas, almacenado por el sustrato 1.9 % y perdido en el drenaje un 18 %.

Cabe mencionar que, el nitrógeno aplicado en todos los sistemas fue en forma de nitratos (NO_3), y de acuerdo con varios autores (Lindsay, 1979; Barber, 1995 citados por Raviv y Lieth, 2008), mencionan que esta forma química de la molécula, posee una alta solubilidad y baja afinidad por las superficies cargadas positivamente en el sustrato, en comparación con otros nutrientes como fosfatos y sulfatos, con lo que se espera poca precipitación o fijación de dicho elemento en el sustrato, por lo que es posible que una alta proporción de nitrógeno se haya perdido por volatilización al convertirse el nitrógeno a una forma gaseosa, ya sea como N_2 o N_2O, o bien por la conversión del amonio a amoniaco (NH_3^+), tal como lo mencionan Mengel y Kirkby (2001) y Alcántar *et al*. (2016).

Por su parte, Barker y Bryson (2006) señalan que las plantas absorben una alta cantidad del nitrógeno que se aplica al suelo, aunque también se dan procesos de lixiviación, desnitrificación, volatilización y fijación del mismo.

Cuadro 13. Balance de nitrógeno en g·planta^{-1} y porcentaje respecto al total aplicado por planta (entre paréntesis) de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Total aportado	Absorbido por la planta	Iones solubles en el lixiviado	Estimado del precipitado o perdido
Con recirculación con acolchado	11.2 (100)	4.12 (36.7)	1.1 (9.8)	5.98 (53.5)
Con recirculación sin acolchado	13.2 (100)	4.03 (30.5)	1.2 (9)	7.94 (60.5)
Sin recirculación con acolchado	13.7 (100)	4.5 (33)	1.3 (9.4)	7.9 (57.6)
Sin recirculación sin acolchado	16.2 (100)	4.7 (30.5)	1.3 (8)	10.2 (61.5)

Respecto al balance de fósforo, se determinó que, del total aportado, un 32 a 49 % fue absorbido por las plantas (Cuadro 14). Se encontró una baja cantidad P en los drenajes (2.1 a 2.5 %) y el restante probablemente que varió entre 48 a 65% quedó fijado en el sustrato o en forma precipitada en el mismo o como sales no disueltas. Estos datos se asemejan al estudio en jitomate realizado por Pineda *et al.* (2011), donde encontraron que, el 54.8 % de P se quedó retenido en el sustrato, 38.3 % fue absorbido por las plantas y 6.8% lixiviado.

Es importante notar que los mayores porcentajes de fijación más precipitación se dieron en los sistemas sin acolchado, indicativo de que una alta evaporación provocada por la superficie descubierta del tezontle pudo incrementar la proporción de fosfatos precipitados (Cabañas, 2020).

Cuadro 14. Balance de fósforo en g·planta^{-1} y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Total aportado	Absorbido por la planta	Iones solubles en el lixiviado	Estimado del precipitado o perdido
Con recirculación con acolchado	2.2 (100)	1.09 (49.5)	0.046 (2.1)	1.06 (48.4)
Con recirculación sin acolchado	2.6 (100)	0.93 (35.8)	0.066 (2.5)	1.58 (61.7)
Sin recirculación con acolchado	2.7 (100)	1.17 (43.3)	0.059 (2.2)	1.49 (54.4)
Sin recirculación sin acolchado	3.2 (100)	1.04 (32.5)	0.07 (2.2)	2.09 (65.3)

En el caso del potasio, del total aportado, del 31 al 41 % fue absorbido por la planta, 3 a 4 % se lixivió en el drenaje y entre 45 y 65% quedo precipitado o fijado en el sustrato o una parte podría estar precipitado en los drenajes (Cuadro 15).

Los datos de absorción por planta coinciden parcialmente con los reportados por Aragón (2019), donde registró un 47% de potasio absorbido por la planta, en cuanto al contenido en la solución drenada, los valores tienden a ser inferiores (3 a 4 %) a los reportado por el mismo autor (15, 12 %). En cuanto al precipitado o fijado en el sustrato (26%), el valor obtenido en el presente experimento fue superior. Por su parte, Pineda *et al*. (2011) registraron 39.3 % absorbido por la planta, 35.1 % retenido en el sustrato y 25.5 % perdido en el drenaje.

Brown (2008) señala que el potasio es muy soluble en agua, pero no se lixivia fácilmente. Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008) mencionan que este nutriente no está involucrado en las reacciones de precipitación a un valor apreciable, por lo que es muy probable que en esta investigación la proporción de potasio faltante haya quedado fijado en el sustrato.

De manera similar al fósforo los mayores porcentajes de fijación más precipitación se dieron en los sistemas sin acolchado.

Cuadro 15. Balance de potasio en g·planta^{-1} y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Total aportado	Absorbido por la planta	Iones solubles en el lixiviado	Estimado del precipitado o perdido
Con recirculación con acolchado	14.0 (100)	5.7 (41)	0,548 (3.9)	7.7 (55.4)
Con recirculación sin acolchado	16.5 (100)	5.4 (33)	0,574 (3.5)	10.44 (63.5)
Sin recirculación con acolchado	17.1 (100)	6.3 (37)	0.618 (3.6)	10.17 (59.4)
Sin recirculación sin acolchado	20.3 (100)	6.2 (31)	0,662 (3.3)	13.4 (65.7)

El balance final para el calcio (Cuadro 16), indica que del total aportado en cada sistema durante el todo el ciclo del cultivo, solo el 5 al 7 % fue absorbido por la planta, 15 a 23 % fue drenado, del restante (70 a 79 %) probablemente una parte drenó y precipitó como fosfato de calcio en la solución drenada, y la otra parte se haya fijado o precipitado en el sustrato tal como lo mencionan Baca *et al*. (2016).

Estos datos obtenidos son ligeramente inferiores a los reportados por Aragón (2019), donde reporta que, del total de Ca aplicado, solo el 20 % fue absorbido por la planta, el 32 % lixiviado en el drenaje y 12 % fue resolubilizado del sustrato; el 36 % restante lo adjudicó a posible precipitación o absorción por el sustrato.

Asimismo, Pineda *et al.* (2011) en su investigación registraron que, del total aplicado, un 24.3 % fue absorbido por la planta, 38.8 % retenido en el sustrato y 36.8 % perdido en el drenaje. Así mismo, Sánchez *et al*. (2014) encontraron que, en un sistema abierto en camas con sustrato de tezontle y plantas de jitomate, el 56 % del total de calcio aplicado fue absorbido por la planta y el 44 % restante fue considerado como desechado.

Cuadro 16. Balance de calcio en g·planta-1 y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Total aportado	Absorbido por la planta	Iones solubles en el lixiviado	Estimado del precipitado o perdido
Con recirculación con acolchado	13.7 (100)	1 (7.3)	3.09 (23)	9.58 (70)
Con recirculación sin acolchado	16.2 (100)	0.85 (5.3)	3.11 (19)	12.2 (75)
Sin recirculación con acolchado	16.8 (100)	1.15 (6.8)	3.00 (18)	12.6 (75)
Sin recirculación sin acolchado	19.9 (100)	1.16 (5.8)	3.10 (16)	15.6 (79)

Finalmente, el balance de azufre (Cuadro 17), muestra que del total aportado durante el ciclo del cultivo en todos los sistemas de hidroponía, solo el 5 al 7% fue absorbido por la planta, mientras que en el lixiviado del drenaje se encontró del 10 al 14 %, la cantidad restante, es decir, entre un 80 a 94 % posiblemente tuvo reacciones de precipitación o fijación en el sustrato o precipitación en la solución drenada ya que el calcio al mezclarse con el azufre forma sulfato de calcio, que es muy poco soluble como lo menciona Lindsay (1979) y Barber (1995) citados por Raviv y Lieth (2008), e incluso es posible que una parte del azufre se haya perdido por volatilización (Claros, 2012).

Cuadro 17. Balance de azufre en g·planta-1 y porcentaje respecto al total aplicado (entre paréntesis) por planta de jitomate durante los 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Total aportado	Absorbido por la planta	Iones solubles en el lixiviado	Estimado del precipitado o perdido
Con recirculación con acolchado	12.6 (100)	0.95 (7.5)	1.59 (12.6)	10 (80)
Con recirculación sin acolchado	16.1 (100)	0.89 (5.5)	1.63 (10.1)	13.6 (84)
Sin recirculación con acolchado	14.5 (100)	1.03 (7.1)	1,65 (11.4)	11.8 (82)
Sin recirculación sin acolchado	16.7 (100)	1.08 (6.5)	1.61 (9.6)	14 (84)

Se puede destacar que el sistema con recirculación combinado con la técnica del acolchado tuvo una tendencia de mayor porcentaje de absorción de los distintos nutrientes. Asimismo, en los sistemas hidropónicos evaluados, más del 50 % de los macronutrientes se encuentran precipitados, fijados o volatilizados en la fracción no cuantificada por lo que se requieren estudios encaminados reducir estas pérdidas y aumentar la eficiencia de absorción.

Es importante resaltar también que el sistema de hidroponía profunda consumió menor cantidad de macronutrimentos comparado con el resto de los sistemas.

En cuanto a la cantidad de macronutrientes absorbidos por las plantas en cada sistema, todos estuvieron dentro de los rangos de suficiencia que se han reportado para el cultivo de jitomate (Sánchez, 2004), por lo que no se afectó el rendimiento final.

4.8 Eficiencia en el uso de agua y nutrientes

La necesidad de la agricultura actual por encaminar hacia la sostenibilidad, ha creado la posibilidad de volver estos sistemas más eficientes en cuanto al uso de los recursos. Por ello, el ahorro de agua y nutrimentos, sin disminuir el rendimiento, es muy importante para los productores, ya que se pueden reducir los costos de producción y reducir las descargas de fertilizantes al medio ambiente, aminorando la acumulación de fertilizantes en el manto freático.

En cuanto a la eficiencia alcanzada en el uso del agua para producir un kilogramo de fruto de jitomate con los diferentes sistemas de hidroponía (Cuadro18), se observa que el sistema de hidroponía profunda y el sistema con recirculación de solución nutritiva con acolchado presentaron los valores más bajos para producir un kilogramo (23 y 25 $L \cdot kg^{-1}$ respectivamente), comparado con el sistema sin recirculación sin acolchado que ocupó 35.5 litros para producir un kg de fruto de jitomate, lo que representa un 28 y 34% mayor eficiencia en el uso del agua respectivamente.

Los datos obtenidos superan a los reportados por Marfá (2000), quien, con un sistema con recirculación de solución nutritiva, alcanza una eficiencia de 37.9 litros por kg de fruto de jitomate producido; el mismo autor menciona que, para un sistema abierto, el gasto asciende hasta 54.8 litros/kilogramo. Aragón (2019) reportó 32 litros para producir un kg de fruto de jitomate. Según Salazar *et al*. (2014) en España en condiciones de invernadero, son necesarios 30 a 40 litros de agua por kg de fruto producido y, en Holanda con un mayor control de las condiciones ambientales, el gasto de agua es de solamente 15 litros por kilogramo.

Cuadro 18. Eficiencia de cada sistema en el uso de agua para producir un kg de fruto de jitomate en los sistemas hidropónicos probados.

Tratamientos	**Consumo de agua ($L \cdot m^{-2}$)**	**Rendimiento ($Kg \cdot pl^{-1}$)**	**Eficiencia ($L \cdot Kg^{-1}$)**
Con recirculación y acolchado	56.2	2.2	25.5
Con recirculación sin acolchado	64.2	2.0	32.1
Sin recirculación y acolchado	69.3	2.3	30.1
Sin recirculación sin acolchado	78.2	2.2	35.5
Hidroponía profunda	61.2	2.6	23.5

En cuanto a la eficiencia del uso de nutrientes en los sistemas hidropónicos evaluados se observa que el sistema de hidroponía profunda y el sistema con recirculación con acolchado fueron los más eficientes, comparado con el sistema sin recirculación sin acolchado (Cuadro 19). En estos dos sistemas se aplicaron menores cantidades de los macroelementos para producir un kg de jitomate.

En el tratamiento testigo (sin recirculación sin acolchado) se usó una mayor cantidad de todos los nutrientes.

Considerando todos los tratamientos, en promedio para producir un kg de jitomate en peso fresco se aplicaron: 5.7 g de nitrógeno, 1.4 g de fósforo, 7.2 g de potasio, 6.6 g de calcio, 1.1 g de magnesio y 7.02 g de azufre.

Cuadro 19. Eficiencia de cada sistema en el uso de macronutrientes en gramos del elemento para producir un kg de fruto de jitomate en los sistemas hidropónicos probados.

Tratamiento	Rendimiento ($Kg \cdot pl^{-1}$)	Eficiencia (g /Kg)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Con recirculación y acolchado	2.2	5.1	1.0	6.4	6.2	1.0	5.7
Con recirculación sin acolchado	2.0	6.6	1.3	8.3	8.1	1.3	8.1
Sin recirculación y acolchado	2.3	6.0	1.2	7.4	7.3	1.2	6.3
Sin recirculación sin acolchado	2.2	7.4	1.5	9.2	9.0	1.5	7.6
Hidroponía profunda	2.6	3.6	0.7	4.7	2.8	0.5	7.4

Considerando los valores del cuadro 20 en relación al ahorro de agua y fertilizantes respecto al sistema sin recirculación y sin acolchado (testigo), para una hectárea de invernadero en un ciclo de producción de 100 días de trasplante a fin de cosecha y considerando una densidad de población de 8 plantas/m^2, el ahorro de agua consumida y nutrientes aportados, fue del 28 y 30% de todos los macronutrimentos para el sistema con recirculación con acolchado, del 17 y 18% para el sistema con recirculación sin acolchado, mientras que en el caso del sistema sin recirculación con acolchado fue del 11 al 15%; por último, el sistema de hidroponía profunda registro un ahorro de 21 % en agua, aproximadamente un 40 a 47% de nitrógeno, fosforo y potasio y un 60% de calcio y magnesio.

Destaca también un excesivo consumo de azufre por el sistema de hidroponía profunda, necesario para mantener ligeramente ácido el pH de la solución a lo largo del ciclo de cultivo.

Cuadro 20. Ahorro de agua ($m^3 \cdot ha^{-1}$) y macronutrientes ($kg \cdot ha^{-1}$) con respecto al testigo sin recirculación y sin acolchado durante 100 días de trasplante a fin de cosecha en diferentes sistemas hidropónicos. Valores entre paréntesis indican porcentajes de ahorro.

Tratamientos	Consumo de agua	N	P	K	Ca	Mg	S
Recirculación con acolchado	4500 (28.1)	899 (30.8)	179 (30.8)	1122 (30.8)	1097 (30.8)	180 (30.8)	1008 (24.5)
Recirculación sin acolchado	5140 (17.9)	1059 (18.5)	211 (18.5)	1322 (18.4)	1292 (18.4)	212 (18.4)	1288 (3.6)
Sin recirculación con acolchado	5540 (11.5)	1099 (15.4)	219 (14.4)	1372 (15.4)	1341 (15.4)	220 (15.4)	1160 (13.2)
Sin recirculación sin acolchado	6260 (0)	1299 (0)	259 (0)	1621 (0)	1585 (0)	260 (0)	1336 (0)
Hidroponía profunda	4900 (21.7)	745 (42.6)	135 (47.8)	978 (39.6)	592 (62.6)	90 (65.4)	1532 (-14.7)

5 CONCLUSIONES

1. Gracias a las condiciones de menos estrés hídrico y nutricional que se dan con el sistema de hidroponía profunda, las plantas bajo este sistema alcanzaron menor altura con mayor diámetro de tallo y mayor área foliar con respecto a los demás sistemas hidropónicos probados.
2. Las plantas con mayores valores de peso seco total correspondieron a los sistemas sin recirculación de la solución nutritiva con acolchado y al de hidroponía profunda, posiblemente porque se pudieron mantener condiciones hídricas y nutricionales más estables a lo largo del ciclo de cultivo.
3. El mayor rendimiento y tamaño de fruto correspondió a las plantas bajo el sistema de hidroponía profunda también como consecuencia de que se pudo mantener una mayor estabilidad en las condiciones hídricas y nutricionales.
4. En los sistemas con recirculación de la solución nutritiva se presentaron ahorros de 18 % en consumo de agua y del 14 al 19 % en los macronutrimentos aportados; además tuvieron una eficiencia de absorción de nutrientes mayor en 12 al 15% respecto a los sistemas sin recirculación.
5. El sistema con recirculación y con acolchado tuvo un ahorro del 12.4% en agua y de 15 a 23 % en los diferentes macronutrientes aportados con respecto al mismo sistema sin acolchar, beneficio que sin duda paga el costo económico del acolchado.
6. Con el sistema de hidroponía profunda, además de tener el más alto rendimiento y tamaño de fruto, se lograron ahorros de 20 % en agua y hasta 60% en nutrientes respecto a los demás sistemas hidropónicos evaluados.
7. En cuanto a la eficiencia nutrimental, con el sistema de hidroponía profunda se requirió menor cantidad de agua y nutrientes para producir un kg de jitomate.

Las conclusiones anteriores dan sustento a la hipótesis planteada en este trabajo en el sentido de que mediante el manejo de jitomate con ciclos de cultivo cortos es factible, sin la necesidad de análisis químicos, mantener equilibrada la solución nutritiva y bajo control la diseminación de enfermedades de la raíz en

los sistemas hidropónicos con recirculación, por lo que pueden rendir al menos lo mismo que los sistemas sin recirculación, permitiendo un mayor ahorro en agua y fertilizantes y una mayor eficiencia en la producción de fruto.

6 LITERATURA CITADA

Adams, P. (2004). Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo en relación al suelo. In: Urrestarazu, G. M. (ed). Tratado de Cultivo sin Suelo. 3a Ed. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp. 81-111

Alarcón, A. L.; Faz, A.; Egea, C.; Brañas, F. J. (2001). Macroelements uptake and ionic interrelationships of a tomato soilless crop in recirculating system. Acta Horticulturae. 559: 529-534.

Alarcón, V. A. (2006). Bases y sistemas de los cultivos sin suelo En: Cultivos sin Suelo. Alarcón V. A. (ed.). Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura, S. L. Reus. España. Pp. 11-21.

Alcántar, G. G. y Trejo-Téllez, L. I. (2013). Nutrición de Cultivos. Editorial del Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México. 454 p.

Alcántar, G. G., Trejo-Téllez, L. I., Fernández, P. L. y Rodríguez, M. M. de las N. (2016). Elementos esenciales. En Alcántar, G. G., Trejo-Téllez, L. I. y Gómez, M. F. C. (Eds*.), Nutrición de cultivos.* Editorial BBA. Texcoco, México. Pp: 21-55 pp.

Aragón, R. L. A. (2019). Efectos Agronómicos e Impacto Económico de Fuentes Fertilizantes, Concentraciones Nutrimentales y Acolchado sobre un Cultivo Hidropónico de Jitomate. Postgrado en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. (Tesis de Maestría en Ciencias). p 136.

Argo, R. W. and Biernbaum, A. J. (1995). The effect of irrigation method, water-soluble fertilization, preplant nutrient charge, and surface evaporation on early vegetative and root growth of Poinsettia. Journal of the American Society of Horticultural Sciences, 120:163-169.

Asociación Mexicana de Horticultura Protegida AC (AMHPAC). (2018). Agricultura Protegida en México. Consultado en: http://amhpac.org/2018/images/PDFoficial/HorticulturaenMexico.pdf

Baca, C. G. A. de J., Rodríguez, C. E. y Quevedo, N. A. (2016). La solución nutritiva en hidroponía. Editado por los Autores. Texcoco, Edo. de México. 208 p.

Barker, A. V. and Bryson, G. M. 2006. Nitrogen. In Barker, A. V. and Pilbeam, D. J. (Eds.), *Handbook of plant nutrition*. CRC Taylor & Francis Group. Boca Raton. pp 21-50

Benoit, F. & Ceustemans (1994). Horticultural aspects of ecological soilless growing methods. Acta Horticulturae. 396. pp. 11-24.

Bergstrand, K. J. (2010). Approaches for mitigating the environmental impact of greenhouse horticulture. Doctoral Thesis. Acta Universitatis Agriculturae.

Swedish University of Agricultural Sciences, Sueciae. guide for the soilless grower. Jones, J. B. (ed.). Chemical Rubber Company PRESS. USA.

Blanco, F. F.; Folegatti, M. V. (2002). Salt accumulation and distribution in a greenhouse soil as affected by salinity of irrigation water and leaching management. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(3), 414-419. https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300006.

Bohme, M. (1996). Influence of closed systems on the development of cucumber. ISOSC procedings, 75-87

Bowen, G. D.; Rovira, A. D. (1976). Microbial colonization of plant roots. Annual Review of Phytopalogy, 14: 121-144.

Cabañas, D. A. (2020). Evaluación de Métodos de Recirculación de Solución Nutritiva para el Cultivo de Jitomate Manejado en Alta Densidad de Población. Postgrado de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo Chapingo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. 91 p.

Cánovas, M. F.; Magán, C. J. J. (2003). Cultivos sin suelo. In: Camacho, F. F. (ed): Técnicas de Producción en Cultivos Protegidos. Instituto Cajamar. Madrid, España. pp. 409-453.

Cánovas, M., F. (1999). Sistema de cultivos hidropónicos. En: Fernández, F. y Cuadrado, G. I. M. Cultivos sin Suelo II. Dirección General de Investigación y Formación Agraria, Fundación para la Investigación Agraria de la Provincia de Almería; Caja Rural de Almería. Almería, España. P 223.

Castellanos, J. Z. y Borbón, C. M. (2009). Panorama de la horticultura protegida en México. En Castellanos, J. Z. (Ed.), Manual de producción de tomate en Invernadero. Intagri. Guanajuato, México. pp: 1-18.

Castilla N. y Hernández J. (2005). The Plastic Greenhouse Industry of Spain. Chronica Horticulturae. 45: 15-20.

Claros, B. J. A. 2012. Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. Tesis Doctoral. Universitat Politécnica de Valéncia, Valencia. p 254.

Cooper, A. J. (1975). Crop production in recirculating nutrient solutions. Scientia horticulturae, 3:251-258.

Cooper, A. J. (1977). Nutrient control of a nutrient- film tomato crop. Scientia horticulturae,7: 189-195.

Craver, J. K. and López, R. G. (2016). Control of morphology by manipulating light quality and daily light integral using LEDs. *In*: Kozai, T.; Fujiwara, K.; Runle, E. S. (eds). Led Lighting for Urban Agriculture. Springer. Singapore, Singapore. pp: 203-217.

Díaz, P. J. C. and Dean, B. K. (2002). Colored plastic film mulches affect tomato growth and yield via changes in root-zone temperature. *Journal of the American Society of Horticultural. Sciences*, 127:127-136.

Díaz, S. T.; Espi, G. E.; Fontecha, R. A.; Jiménez, G. J.; López, G. J.; Salmerón, C. A. (2001). Los filmes plásticos en la producción agrícola. Madrid, España. 320 p.

Durán, R. F. (2010). Manual de cultivos hidropónicos. Grupo Latino Editores. Colombia. 424 p. ISBN: 9789588203966

Empresa Enza Zaden (s, f). Variedad Pai Pai. Recuperado de: https://www.enzazaden.com/mx/products-and-services/our-products/Tomates/Paipai

Espi E, Salmeron A, Fontecha A, García-Alonso Y, Real AI (2006) Plastic films for agricultural applications. *The Journal of* Plastic Film *and* Sheet. 22: 85-102.

Estado actual de la agricultura protegida en México. (2017). Recuperado de: https://www.berger.ca/es/recursos-para-los-productores/tips-y-consejos-practicos/estado-actual-la-agricultura-protegida-mexico/Estructuras_utilizadas_en_la_agricultura_protegida.pdf

Farina, E. & Allera, C. & Paterniani, T. & Palagi, M. (2003). Mulching as a technique to reduce salt accumulation in soilless culture. *Acta Horticulturae*. 609. 459-466. 10.17660/ActaHortic.2003.609.71.

Fernández, F. M. M.; Aguilar, P. M. I.; Carrique, P. J. R.; Domingo, J.T.; García, G. C.; López, R. M. y Pérez, M. J. M. (2014). Suelo y medio ambiente en invernaderos. 5ª ed. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Sevilla.España. p 135.

Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA). (2007). Agricultura protegida. Cultivo de Tomate en Invernadero. Dirección de Consultoría en Agronegocios. Dirección Regional del Norte, México.

Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA). (2019). Panorama Agroalimentario, Tomate Rojo. Dirección General de investigación y Evaluación Económica y Sectorial. FIRA. Consultado en: https://www.inforural.com.mx/fira-panorama-agroalimentario-tomate-rojo-2019/

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2013). Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops, principles for Mediterranean climate areas. FAO. Roma. 640 p.

Furuta, T.; Mock, T. and Coleman, R. (1977). Estimating the water needed for container-grown nursery stock. American Nurseryman. California. University, Berkeley. Agricultural Extension Service. 145:68-73.

García E. (1988). Los climas del Valle de México, según el sistema de clasificación climática de Koppen. 4ta. Edición. Instituto de geografía. Universidad nacional autónoma de México, D.F., México. pp: 132.

García, M. (1997). Eficacia en el uso de la fertirrigación recirculante en cultivos hortícolas sin suelo bajo condiciones de clima semiárido. Tesis doctoral. Universidad de Almería, España. Pp 147.

García, M.; Escobar, I.; Lorenzo, P.; Guzmán, M.; Urrestarazu, M. (1998). Water consumption and yield for a reuse drainage water system in mediterranean plastic house conditions. *Acta Horticulturae*, 458: 363-367.

García, M.; Urrestarazu, M. (1998). La recirculación de la disolución nutritiva en el área mediterránea. Caja rural de Granada. Granada. España. P:171.

Giuffrida, F.; Leonardi, C. (2009). Nutrient solution concentrations in soilless closed system. *Acta Horticulturae*. 807: 463-468.

Guardiola, B. J. y García, L. G. (1990). Fisiología vegetal I: Nutrición y transporte. Editorial Síntesis. España. pp: 201-202.

Hannan, J. (1998). Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. 1ª edición. Editorial Boca Raton; *Chemical Rubber Company Press.* Colorado, Estados Unidos. 708 p.

Heuvelink, E. and M. Dorais. (2005). Crop growth and yield. In: Heuvelink (ed.). Tomatoes. CAB Publishing. Wallingford, UK. pp. 85-144.

Heuvelink, E.; Li, T.; Dorais, M. (2018). Plant growth and yield. In: Heuvelink, E. (editor). Tomatoes 2nd Edition. CABI. Wageningen, The Netherlands. pp 89-136.

Hopkins, W. G. and Hüner, N. P. A. (2009). Introduction to Plant Physiology (Fourth edition). John Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, USA. 503 p.

Huang, W. Y. (2009). Factors Contributing to the Recent Increase in U.S. Fertilizer Prices, 2002-08. Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC. 21 p.

Ibarra, J. L. y Rodríguez, P. A. (1991). Acolchado de Suelos con Películas Plásticas. Primera edición. Editorial Limusa. México, D.F. 132 p.

Jaramillo, N. J.; Rodríguez, V. P.; Guzmán, A. M. y Zapata, M., A. (2006). El cultivo de tomate bajo invernadero. Boletín Técnico No. 21. CORPOICA. Centro de Investigación Selva Rionegro. Antioquía, Colombia. 48 p.

Jensen, M. H. (2004). Agricultura en ambientes controlados en desiertos y trópicos. Memorias del curso internacional de invernadero. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Jiang W, Qu D, Mu D, Wang LR (2004) China's Energy-saving Greenhouses. *Chronica Horticulturae*. 44: 15-17.

Jishi, T. (2018). Led lighting technique to control plant growth and morphology. In: Kosai, T. (ed). Smart Plant Factory. Springer. Singapore, Singapore. pp: 11-222.

Jones, J. B. (2005). Systems of hydroponic/soilless culture. *In*: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. Jones, J. B. (ed.). *Chemical Rubber Company Press.* PRESS. USA. pp. 117-121.

Juárez-López, P.; Bugarín-Montoya, R; Castro-Brindis, R.; Sánchez-Monteón, A.; Cruz-Crespo, E.; Juárez-Rosete, C. R.; Alejo-Santiago, G. y Balois-Morales, R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. Revista Fuente. 3:21-27.

León, G. H. M. (2001). Manual para el cultivo de tomate en invernadero. Gobierno de Chihuahua. Chihuahua, México. 239 p.

León, R. E. (2009). Buena Práctica Agricultura Protegida. Proyecto Centro de Desarrollo Rural FSG 963. Universidad del Valle de Guatemala y Fundación Soros Guatemala. Guatemala. 34 p

Liang, W.; Jiang, Y.; Zhang, Y. (2006). Accumulation of soil soluble salt in vegetable greenhouses under heavy application of fertilizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1: 123-127.

López, L. R. A.; Arteaga, R. M. A.; Vázquez, P. I. L.; López, C.; y Sánchez, I. C. (2009). Producción de tomate de cáscara (Physalis ixocarpa Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15:83-89.

Manzano-Agugliaro, F. (2007). Gasificación de residuos de invernadero para la obtención de energía eléctrica en el sur de España: Ubicación mediante SIG. Interciencia, 32(2),131-136. [fecha de Consulta 31 de octubre de 2020]. ISSN: 0378-1844. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=339/33932210

Marfá, O. (2000). Los cultivos sin suelo desde una perspectiva mediterránea. En: Marfá, O. (Ed.). Recirculación en cultivos sin suelo. Ediciones de Horticultura, S. L. Compendio de Horticultura 14. Barcelona, España. P. 13-38.

Marfá, O.; Casadesus, J.; Cáceres, R. (2006). Recirculación en Cultivos sin suelo. En: Alarcón, V. A. (Coordinador). Cultivos sin Suelo. Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura. Reus, España. pp 175-190.

Massa, D.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Carmassi, G., Campiotti, C. A.; Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from solilless culture of greenhouse tomato. Agric. Water Manage 97: 971-980.

Massey, D. M.; Winsor, G. W. (1980). Some respones of tomatoes to nitrogen in reciculating solutions. *Acta Horticulturae*, 98:127-133.

Méndez, G. T.; Sánchez, Del C. F.; Sahagún, C. J. y Contreras, M. E. (2005). Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección este-oeste. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11:185-192.

Mengel, A. and Kirkby, K. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers. 5ª edition. Netherlans. 849 p.

Mia, B. M. A. (2015). Nutrition of crop plants. Nova Publishers. Nueva York, E.U.A. 187 p.

Molitor, H. D.; Fischer, M. (1998). Stock plant cultivation in rockwool with and without recycling the nutrient solution. ISOSC Proceedings, 323-333.

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- Japanese Society for Horticultural Science*. 79: 47-55.

Noguera, V.; Abad, M.; Garcia-Codoñer, A. C.; Armenjol, F.; Serrano, A.; (1986). Seasonal productivity of tomato grown in recirculating nutrient solution culture during Winter and spring in the east mediterranean coast Spain. *Acta Horticulturae*, 191: 179-187.

Noguera, V.; Abad, M.; Pastor, J. J.; Mora, J.; Armenjol, F.; Serrano, A.; Garcia-Codoñer, A. C. (1988). Growth and development, wáter absortion and mineral composition of tomato plants grown with the nutrient film technique in the east mediterranean coast región of Spain. *Acta Horticulturae*, 221:203-209.

Oriolani, M.; De Torrontegui, A.; Martin, G. (1979). Uso de película de polietileno como cobertura de suelo. Folleto INTA N° 57. 30p.

Os, E. A. Van (1994). Closed growing systems for more efficient and enviromental friendly production. *Acta Horticulturae*. 361:194-200.

Ozkan B, Kurklu A, Akcaoz H (2004) An Input-output energy analysis in greenhouse vegetable production: a case study for Antalya region of Turkey. Biomass Bionerg. 26: 89-95.

Papaseit, P.; Badiola, J. y Armengol, E. (1997). Los plásticos y la Agricultura. 1ª edición. Horticultura, S. L. Editorial SPE.3. Reus, Barcelona, España. 204 p.

Pardossi A, Tognoni F, Incrocci L. (2004). Mediterranean Greenhouse Technology. *Chronica Horticulturae* 44: 28-34

Pardossi, A.; Incrocci, L.; Massa, D.; Carmassi, G.; Maggini, R. (2009). The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Horticulturae*. 807: 445-450.

Peet, M. M. (2005). Irrigation and fertilizatin, pp. 171-198. *In*: Tomatoes. Heuvelink, E. (ed.). CABI Publishing. London, UK.

Peet, M. M.; and Welles, G. (2005). Greenhouse tomato production. In: Tomatoes. E. Heuvelink (ed) CABI Publishing. Oxfordshire, UK. pp: 257-304.

Picken, A.J.F. (1984). A review of pollinitation and fruit set in tomato (*Lycopersicon Esculentum* Mill.). *Journal Horticulture Science*. p 59:1-133.

Pineda J., A. Ramírez-Arias, F. Sánchez del Castillo, A. M. Castillo-González, L. A. Valdez-Aguilar and J. M. Vargas-Canales. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 893:997-1005.

Pratt, L., y Ortega, J., M. (2019). Agricultura protegida en México: elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado. NOTA TÉCNICA Nº IDB-TN-1668. Banco Interamericano de Desarrollo.

Programa PYMERURAL (2013). Agricultura Protegida. Serie: Innovaciones Tecnológicas. Tegucigalpa, Honduras. PYMERURAL, 36 páginas. Recuperado de: www.pymerural.org/agriculturaprotegida.

Quesada-Roldán, G. y F. Bertsch-Hernández. (2013). Obtención de la curva de extracción nutrimental del hibrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, 31:1-7

Ramos, C. (1993). La hidroponía y el medio ambiente. En: Cultivos sin suelo. Ed. Canova Martínez, F. y Díaz Álvarez, J. R. Instituto de estudios almerienses y FIAPA. 363-372. Almería.

Raviv, M. and Lieth, H. (2008). Significance of soilless culture in agriculture. In: Soilless Culture: Theory and Practice. M. Raviv and H. Lieth (eds.). Ed. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp. 1-11.

Raviv, M.; Reuveni, R.; Krasnovsky, A.; Medina, S. (1995). Recirculation of rose drainage wáter under semi-arid conditions. *Acta Horticulturae*, 401:427-433.

Resh, H. M. (1992). Cultivos hidropónicos. 3ª ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 369 p.

Resh, H. M. (1996).Hidroponic food production. 5ª edición. Woodbridge. Santa Bárbara, California Estados Unidos. 558 p.

Resh, H. M. (2013). Hydroponic Food Production. Seventh Edition. CRC Press. Boca Raton, Florida. 378 p.

Salazar, M. R., Rojano, A. A. y López, C. I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada*. Tecnología y Ciencias del Agua*, 5: 177-183.

Salazar, M., R.; Rojano A., A.; Figueroa HE., E. y Pérez S., F. (2017). Rentabilidad en la producción de hortalizas en ambientes controlado. Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-I. -©ECORFAN, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco de Mora, México. P.4-11.

Sánchez Del C, F.; Moreno P., E. del C. (2017). Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 405 p.

Sánchez del C. F. y Escalante E. (1988). Hidroponía 3ª edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.

Sánchez Del C., F.; Moreno P., E y Contreras M., E. (2012). Development of Alternative Crop Systems for Commercial Production of Vegetables in Hydroponics – I: Tomato. Acta Horticulturae 947:179-188.

Sánchez Del C., F.; Moreno P., E.; Pineda P., J.; Osuna J., M.; Rodríguez P., J. E.; Osuna E., T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* 48(2):185-197.

Sánchez, Del C. F. y Moreno, P. E. del C. (2016). Validación Comercial de un Sistema de Producción de Jitomate Basado en la Formación de Doseles en Forma de Escalera. Informe Técnico del Proyecto de Transferencia de Tecnología 2015. Dirección General de Investigación y Postgrado. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 26 p.

Sánchez, Del C. F. y Ponce, O. J. (1998). Densidad de plantación y nivel de despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo Serie Horticultura.* 4(2): 69-93.

Sánchez, Del C. F.; Corona, S. T. (1994). Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntes y altas densidades. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 1(2): 109-114.

Sánchez, Del C. F.; Moreno, P. E. del C.; Coatzín, R. R.; Colinas, L. M. T. y Peña, L. A. (2010). Evaluación agronómica y fisiotécnica de cuatro sistemas de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16(3): 207-214.

Sánchez, Del C. F.; Moreno, P. E. del C.; y Cruz, A. E. L. (2009). Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. Revista Chapingo Serie Horticultura, 15(1):67-73.

Sánchez, P. A. (2004). Análisis y diagnóstico nutricional en los cultivos sin suelo. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo*. 3ª edición. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España. pp: 49-79.

Savvas, D. (2002). Nutrient solution recycling. In: Savvas, D. and Passam, H. (Eds.) Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo publications, Atenas, Grecia, pp. 197-210.

Savvas, D.; Sigrimis, N.; Chatzieustratiou, E.; Paschalidis, C. (2009). Impact of a progressive Na and Cl accumulation in the root zone on pepper grown in a closed-cycle hydroponic system. *Acta Horticulturae*. 807: 451-456.

Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM). (2020). Comportamiento para Tomate Saladette de primera calidad DF: Central de Abasto de Iztapalapa DFM; Precios en pesos por kg conforme a su presentación comercial. Recuperado de: http://www.economia-sniim.gob.mx/SNIIM-AN/estadisticas/e_fyhAnuario1a.asp?cent=100&prod=TTSA1&ACCION=Aceptar

Sonneveld, C. y Straver, N. (1994). Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. 10 ed. Proefstation voor tuinbouwn onder glas te Naaldiwijk. N°8. Serie: voedingsplossingen glastuinbouw, 45 pags.

Sonneveled, C.; Voogt, W. (2009). Substrates: chemical characteristics and preparation, pp. 227-252. *In*: Plant nutrition of greenhouse crops. Sonnevled, C.; Voogt, W. (eds.). Springer.

Taiz L. y E. Zieger. (2006). Fisiología vegetal, vol I. Publicacions de la Universitat Jaume. España. 1338 p.

Takahashi, K. (1984). Injury by continuous cropping in vegetables: various problems in the cultivation using grafted plants. Yasaishikenjo Kenkyu Shiryo 18: 87-89.

Terabayashi, S.; Muramatsu, I.; Tokutani, S.; Ando, M.; Kitagawa, E.; Shigemori, T.; Date, S.; Fujime, Y. (2004). Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stages and fruit weight of Tomato (*Lycoperusicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. *Journal- Japanese Society for Horticultural Science*. 73: 324-329.

Thompson, R.C.; Swan, S.H.; Moore, C.J.; Saal, F.V. (2009). Our plastic age. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 364:1973-1976

Tüzel, I. H.; Tunali, U.; Tüzel, Y.; Öztekin, G. B. (2009). Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae*. 807: 457-462.

Ucán, C, I.; Sánchez, Del C. F.; Corona, S. T. y Contreras, M. E. (2005). Efecto del manejo de relaciones fuente-demanda sobre el tamaño de fruto de jitomate. Revista Fitotecnia Mexicana 28(1): 33-38.

Urrestarazu, G. M. (2000). Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. *In*: Manual de Cultivos sin Suelo 5. Urrestarazu, G. M. (editor). Mundi-Prensa. Madrid, España. pp 51-94.

Urrestarazu, G. M. (2015). Manual Práctico del Cultivo sin Suelo e Hidroponía. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 267 p.

Urrestarazu, G. M. (1996). Soluciones nutritivas recirculantes. En: Delfín, A. (ed). Hidroponía. Universidad Nacional Agraria la Molina. Centro de investigación de hidroponía y nutrición mineral. Lima, Perú, pp. 171-177.

Urrestarazu, M. (2004). Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. En: M. Urrestarazu (ed.). Tratado de cultivo sin suelo. 3a Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. pp: 3-47.

Urrestarazu, G. M. y Salas, S. M. del C. (2004). Sistemas con sustrato y recirculación de la disolución nutritiva. En Urrestarazu, G. M. (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo*. 3ª edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. pp: 369-421.

Urrestarazu, M. y García, M. (1999). Influencia del manejo de la fertirrigación en sistema recirculante en el consumo de agua y nutrientes en el cultivo de pepino. *Acta de Horticultura*, 26:447-452.

Urrestarazu, M. y Salas, M. C. (2002). El papel de los cultivos sin suelo en la moderna agronomía. Vida Rural, 145:54-58.

Van De Vooren, J. G., Welles, W. H. y Hayman, G. (1986). Glasshouse Crop Production. In: Atherton, J. G. y Rudich, J. (eds). The Tomato Crop. Chapman and Hall. London, England. pp. 581-623.

Van der Houwe, M.S.Y y Ruijs, M. N. A (1993). Milieneuaspecten van de rozenteelt onder glas (I); water en mestoffen. Glasshouse crop research and experimental station. Naaldwijk. Report N°2.

Van Os, E. A. (2009). Comparison of Some Chemical and Non-Chemical Treatments to Disinfect a Recirculating Nutrient Solution. *Acta Horticulturae*. 843: 229-234.

Vargas, A.; Valle, H.; González, M. (2010). Efecto del color y de la densidad del polietileno de fundas para cubrir el racimo sobre dimensiones, presentación y calidad poscosecha de frutos de banano y plátano. *Agronomía. Costarricense*. 34(2):269-285.

Vargas-Canales J. M., A. M. Castillo-González, J. Pineda-Pineda, J. A. Ramírez-Arias y E. Avitia-García. (2014). Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 20*:71-88.

Vaughan, D. y Ord, B. G. (1991). Extraction of potential allochemical and their effects on root morphology and nutrient contents. In: A. Backwell (ed.). Plant Root Growth: Ecology Aspects. Oxford, England. pp. 399-421.

Vázquez, R. J. C.; Sánchez Del C. F, y Moreno, P. E. del C. (2007). Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura,* 13(1):55-62.

Villarreal Z., C. (2013). La agricultura protegida. Vanguardia Mx. Recuperado de: https://vanguardia.com.mx/columnas-laagriculturaprotegida-1747671.html

Wilkerson, D. C., Drees, B. M.; McWilliams, D. y Sweeten, J. M. (1991). Water management guidelines for the greenhouse industry. Texas Agr. Exp. Sta. Pub. B- 5016. Texas A&M Univ., College Sta. USA.

Zekki, H. Gauthier, L. y Gosselin, A., (1996). Growth, productivity and mineral composition of hidroponically cultivated greenhouse tomatoes, with of without nutrient solution recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 121: 1082-1088.