



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**COMPARACIÓN DE SISTEMAS CON Y SIN
RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA
EN UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE**

TESIS

Como requisito parcial para
obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

PRESENTA

JOSÉ MANUEL OSUNA RODRÍGUEZ

Chapingo, México. Junio de 2011



APROBACIÓN

COMPARACIÓN DE SISTEMAS CON Y SIN RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE

Tesis realizada por **José Manuel Osuna Rodríguez**, bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

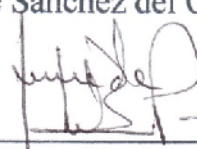
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



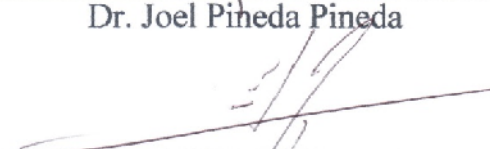
Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR:



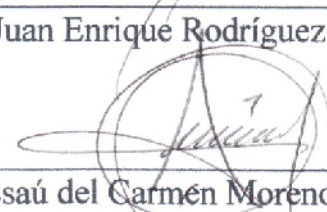
Dr. Joel Pineda Pineda

ASESOR:



Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez

ASESOR:



Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

Chapingo, Estado de México, Junio de 2011.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis se logra gracias a la colaboración de numerosas personas e instituciones Mexicanas que con su saber, deber y apoyo me han orientado y ayudado.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría.

Instituto de Horticultura con sede en el Departamento de Fitotecnia en la Universidad Autónoma Chapingo, por ofrecer el posgrado, así como por la autorización y facilidades para llevar a cabo el trabajo.

Universidad Autónoma de Sinaloa, por el apoyo económico brindado. Una deuda que se paga con mejor enseñanza e investigación.

Dr. Felipe Sánchez del Castillo, su experiencia, apoyo e invaluables conocimientos, sumados en pro del presente trabajo bajo su acertada dirección.

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

Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, por su orientación en la parte estadística y trabajo dedicado a esta investigación.

Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, por sus revisiones y recomendaciones, sin duda enriquecieron la presente investigación.

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

DEDICATORIA

Durante mis estudios siempre tuve el apoyo de las siguientes personas, a quienes dedico el presente trabajo.

Mis padres, Tomás Osuna Enciso y Norma Alicia Rodríguez Salazar; con amor y respeto y por ser ejemplo a seguir.

Paty, mi esposa, por su amor y paciencia en todo momento.

Mis hermanos, Norma Roxana, Samuel, Priscila y Tomas, les deseo siempre lo mejor.

A toda la familia Ayala Ramírez, Osuna Enciso, Rodríguez Salazar y Tejeda.

Sinceramente,

José M. Osuna R.

DATOS BIOGRÁFICOS

El ingeniero José Manuel Osuna Rodríguez, nació en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, el primero de Enero de 1981. Ingresó a la Facultad de Agronomía en la Universidad Autónoma de Sinaloa en el año 1998 obteniendo el título de Lic. en Ciencias Agropecuarias en el Área de Suelos y Agua en el año 2003 con la tesis: Evaluación de sustratos para la producción de pepino europeo (*cucumis sativus* l.) en invernadero en el valle de Culiacán. De Julio de 2004 a Julio de 2005 trabajó en la “Agrícola El Porvenir” localizada en el Valle de Culiacán, Sinaloa. Desde el año 2007 labora como técnico en el laboratorio de Bioquímica Agrícola y Fisiología Vegetal en la Facultad de Agronomía en la Universidad Autónoma de Sinaloa. En enero de 2009 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo, donde realizó estudios de Maestría en Ciencias en horticultura, en el Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia de la misma universidad.

CONTENIDO

APROBACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
DATOS BIOGRÁFICOS.....	v
CONTENIDO	vi
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos específicos	5
1.2 Hipótesis	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
2.1 Agricultura protegida en México	6
2.2 Importancia económica del tomate	7
2.3 Generalidades del tomate	8
2.4 Necesidades climáticas del tomate.....	10
2.4.1 Temperatura	10
2.4.2 Luz	10
2.4.3 Humedad relativa	11
2.4.4 Agua.....	12
2.5 Cultivo de tomate en sistemas protegidos.....	12
2.5.1 Problemas del suelo con la producción intensiva	13
2.6 Hidroponía	13
2.7 Solución nutritiva.....	13
2.7.1 Sustrato	16
2.7.2 Sistema abierto y sistema cerrado.....	17
2.7.3 Ventajas del sistema cerrado.....	22
2.7.3.1 Ahorro de agua.....	22
2.7.3.2 Ahorro de fertilizantes	22
2.7.3.3 Problemas en los sistemas cerrados	24
2.7.3.4 Desinfección de la solución nutritiva.....	25
2.8 Producción de tomate basado en despunte temprano y alta densidad	26
2.9 Análisis del crecimiento vegetal	27
2.9.1 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).....	28
2.9.2 Tasa de asimilación neta (TAN)	29
2.9.3 Razón de área foliar (RAF).....	29
2.9.4 Índice de área foliar (IAF)	30
3. MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 Localización del experimento	32
3.2 Material vegetal	33

3.3	Descripción de los sistemas hidropónicos	33
3.3.1	Camas con recirculación y sin recirculación de drenajes	33
3.3.2	Bolsas con recirculación y sin recirculación de drenajes.....	34
3.3.3	Deep flow technique (DFT).	35
3.4	Manejo experimental	36
3.4.1	Conducción del cultivo	36
3.4.2	Manejo experimental de los tratamientos	38
3.5	Unidad y diseño experimental	40
3.6	Índices y caracteres evaluados	41
3.6.1	Caracteres morfológicos	41
3.6.2	Índices de crecimiento	41
3.6.3	Rendimiento y sus componentes.....	43
3.6.4	Agua y nutrientes	44
3.7	Análisis estadístico.....	44
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1	Caracteres morfológicos	45
4.2	Índices de crecimiento	48
4.2.1	Tasa de asimilación neta (TAN)	54
4.2.2	Tasa de crecimiento del cultivo (TCC).....	55
4.3	Rendimiento y sus componentes.....	57
4.4	Agua y nutrientes	59
4.5	Temperaturas dentro del invernadero	70
5.	CONCLUSIONES	73
6.	LITERATURA CITADA.....	74
7.	ANEXO	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales países productores de tomate en el 2008	7
Cuadro 2. Diferentes concentraciones de la solución nutritiva (SN) usada en sistemas cerrados reportada por diversos autores.....	19
Cuadro 3. Comparación de trabajos en el ahorro de agua y fertilizantes, y su efecto en el rendimiento usando sistemas cerrados con diferentes sustratos en plantas de tomate.	23
Cuadro 4. Composición del agua y solución nutritiva (SN).	37
Cuadro 5. Fuentes fertilizante usadas para preparar y ajustar la solución nutritiva.	37
Cuadro 6. Comparaciones de medias de diámetro de tallo, altura de planta, ancho de copa, y área foliar por planta, durante el ciclo de cultivo de tomate en diferentes sistemas hidropónicos.	46
Cuadro 7. Comparaciones de medias de materia seca total, hojas, tallo, fruto, índice de área foliar (IAF) y razón de área foliar (RAF) durante el ciclo de cultivo de tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.	49
Cuadro 8. Comparaciones de medias para eficiencia metabólica del área foliar (EMAF) e índice de cosecha (IC) en plantas tomate a los 92 ddt en diferentes sistemas hidropónicos.....	52
Cuadro 9. Comparaciones de medias para tasa de asimilación neta (TAN) en distintos periodos de muestreo en diferentes sistemas hidropónicos.	55
Cuadro 10. Comparaciones de medias para tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en distintos periodos de muestreo en diferentes sistemas hidropónicos.	56
Cuadro 11. Comparación de medias de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$, frutos $\cdot\text{m}^{-2}$, peso promedio de fruto y rezaga en tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.	58
Cuadro 12. Comparación de medias de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los diferentes racimos en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	59
Cuadro 13. Uso de nutrimentos (K, Ca, N-NO_3^- y P) en plantas de tomate, cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	60
Cuadro 14. Ahorro estimado de nutrimentos con base en distintos porcentajes de drenaje en dos sistemas hidropónicos cerrados.....	61
Cuadro 15. Consumo estimado de nutrientes con base a los análisis químicos de la solución nutritiva recirculante y consumo reportado por diferentes autores en un cultivo de tomate	63
Cuadro 16. Contenido de K, Ca, N y P en fruto, tallo y hojas en plantas ^x de tomate a los 92 ddt.	65

Cuadro 17. Indicadores de eficiencia en el uso del agua en plantas de tomate, cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	66
Cuadro 1A. Análisis de varianza para de diámetro de tallo, altura de planta, ancho de copa y área foliar por planta durante el ciclo de cultivo de tomate en diferentes sistemas hidropónicos.	88
Cuadro 2A. Parámetros estimados de modelos logísticos para desarrollo de: altura de planta, diámetro de tallo, área foliar y ancho de copa en plantas de tomate.	89
Cuadro 3A. Análisis de varianza de peso seco por planta, hojas, tallo y frutos durante el ciclo de cultivo de tomate, cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.	90
Cuadro 4A. Análisis de varianza de razón de área foliar (RAF), eficiencia metabólica del área foliar (EMAF), índice de cosecha (IC) e índice de área foliar (IAF) durante el ciclo de cultivo de tomate, cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.	91
Cuadro 5A. Parámetros estimados de modelos logísticos para peso seco por planta, tallo hojas, frutos e índice de área foliar (IAF) en plantas de tomate.	92
Cuadro 6A. Análisis de varianza de tasa de asimilación neta (TAN) en distintos periodos.....	93
Cuadro 7A. Análisis de varianza de tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en distintos periodos.....	93
Cuadro 8A. Análisis de varianza de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$, frutos $\cdot\text{m}^{-2}$, peso promedio de fruto y rezaga.....	94
Cuadro 9A. Análisis de varianza de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los diferentes racimos en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Panorámica del experimento e interior del invernadero.....	32
Figura 2.	Camas (a) y bolsas rellenas (b) con arena de tezontle, usadas para los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva. Canal de conducción de la solución nutritiva (c) a la cubeta recolectora.....	35
Figura 3.	Bombas de aire (a) que oxigenaban la solución nutritiva a través de pequeñas mangueras sumergidas (c). Sistema radical en el tratamiento DFT (b y d).	36
Figura 4.	Depósito donde se preparó y ajustó la solución nutritiva (a). Medidor de agua volumétrico (b). Depósitos donde se acumuló los drenajes de los tratamientos cama y bolsa cerrada (c). Lámpara UV usada para desinfectar la solución nutritiva (d).....	40
Figura 5.	Desarrollo de diámetro de tallo (a), altura (b), ancho de copa (c) y área foliar (d) de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.	47
Figura 6.	Promedio de distribución relativa de materia seca de hoja, tallo y fruto en diferentes fechas de muestreo en plantas de tomate cultivadas en hidroponía.....	50
Figura 7.	Índice de área foliar en tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.	51
Figura 8.	Desarrollo de materia seca en toda la planta (a), tallo (b), hojas (c) y frutos (d), en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.	53
Figura 9.	Desarrollo de la tasa absoluta de asimilación neta (TAN) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	55
Figura 10.	Desarrollo de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.	57
Figura 11.	Consumo aparente de K (a), N-NO ₃ ⁻ (b), Ca (c) y P (d) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos cerrados.	62
Figura 12.	Consumo diario de agua en plantas de tomate cultivadas en los tratamientos sin recirculación de la solución nutritiva (a y b) y con recirculación de la solución nutritiva (c y d).	67
Figura 13.	Consumo diario de agua en plantas de tomate cultivadas en hidroponía con la técnica de flujo profundo (Deep flow technique, DFT).	68
Figura 14.	Consumo acumulado de agua en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.....	68

Figura 15. Promedios de CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) en el drenaje de la solución nutritiva en un cultivo de tomate establecido, en diferentes sistemas hidropónicos.	69
Figura 16. Promedios de pH en el drenaje de la solución nutritiva en un cultivo de tomate, establecido en diferentes sistemas hidropónicos.	69
Figura 17. Temperaturas máximas, mínimas y promedio dentro del invernadero durante el desarrollo del cultivo.	70
Figura 18. Temperaturas máximas en el sistema radical de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.	71
Figura 19. Temperaturas mínimas en el sistema radical de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.	72

RESUMEN

COMPARACIÓN DE SISTEMAS CON Y SIN RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN UN CULTIVO HIDROPÓNICO DE JITOMATE

Con el objetivo de valorar la factibilidad de utilizar sistemas hidropónicos cerrados, que otorguen al menos el mismo rendimiento y calidad que los sistemas hidropónicos abiertos, mediante el acortamiento del ciclo de cultivo de jitomate al manejarlo con el sistema de despunte a tres racimos por planta en alta densidad y reducir el gasto de agua y fertilizante, se analizaron caracteres morfológicos, índices de crecimiento, rendimiento y aprovechamiento del agua y fertilizantes bajo los siguientes tratamientos: bolsas y camas rellenas de arena de tezontle rojo con y sin recirculación de la solución nutritiva y un sistema de raíz flotante (RF). Para caracteres morfológicos e índices de crecimiento sólo hubo diferencia estadística en área foliar y materia seca en hojas y tallo por planta a los primeros 25 días después del trasplante (ddt) y tasa de crecimiento del cultivo del periodo de los 25 a 36 ddt a favor del sistema RF. El mayor rendimiento se presentó en RF y bolsa con recirculación (16.7 y 15.3 kg·m⁻², respectivamente). El ahorro de fertilizante (K, Ca, N-NO₃⁻ y P) en los sistemas cerrados en sustrato fue de 41.5 % respecto a los sistemas abiertos. En RF se usó 68 % del fertilizante aplicado, el resto se desechó. Los sistemas cerrados con sustrato respecto a sus testigos presentaron ahorros de agua de 32.6 y 35.8 % en cama cerrada y bolsa cerrada, respectivamente.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., cultivo sin suelo, raíz flotante, sustrato, tezontle.

ABSTRACT

COMPARISON OF SYSTEMS WITH AND WITHOUT RECIRCULATING NUTRIENT SOLUTION IN A HYDROPONIC TOMATO CROP

The objective of this study was to assess the feasibility of using closed hydroponic systems that give at least the same yield and quality as open hydroponic systems by shortening the tomato crop cycle using the system of trimming to three clusters per plant at high density and reducing the cost of water and fertilizer. To this end, we analyzed the morphological characteristics, growth rates, yield, and water and fertilizer use under the following treatments: bags and beds filled with red tezontle (volcanic rock) sand with and without recirculating nutrient solution and a deep flow technique (DFT) system. For morphological characters and growth rates, there was a statistical difference only in leaf area and dry matter in leaves and stems per plant in the first 25 days after transplanting (dat) and in crop growth rate for the period of 25 to 36 dat in favor of the DFT system. The highest yield was obtained in the DF and bag with recirculating nutrient solution systems (16.7 and 15.3 kg·m⁻², respectively). Overall savings of fertilizer (K, Ca, NO₃-and N-P) in closed substrate systems was 41.5 % compared to open systems. The DFT used 68 % of the applied fertilizer, discarding the rest. Compared to their controls, closed substrate systems yielded water savings of 32.6 and 35.8 % in closed bed and bag systems, respectively.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., soilless culture, deep flow technique, substrate, volcanic rock.

1. INTRODUCCIÓN

En México la producción de hortalizas bajo invernadero se ha incrementado considerablemente en los últimos años (AMHPAC, 2010; Flores y Ford, 2010a). El cultivo más importante que se establece bajo invernadero es el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) también conocido como tomate rojo en sus diferentes tipos (saladette o roma, bola, cherry y uva). Dentro de ellos los rendimientos por unidad de superficie han aumentado año con año (Flores y Ford, 2010b). La producción intensiva de tomate en la horticultura protegida, con frecuencia facilita el establecimiento de patógenos en el suelo conforme pasan los ciclos de cultivo (Takahashi, 1984); la acumulación de sales es otro factor que se presenta con frecuencia en la producción intensiva de hortalizas en invernadero, afectando el rendimiento de ciclos posteriores por los cambios de propiedades químicas y físicas del suelo aptas para la agricultura (Liang *et al.*, 2006; Blanco y Folegatti, 2002). Por lo tanto el suelo puede llegar a ser factor un limitante en la producción bajo invernadero.

Una alternativa para solucionar los problemas señalados, es el empleo de la hidroponía, entendiéndose ésta como un sistema de producción en el que las plantas crecen en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte (Urrestarazu, 2000), la cual permite desarrollar el sistema radical de las plantas en completa independencia del suelo.

Para que las plantas de tomate crezcan correctamente, la solución nutritiva debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, conductividad eléctrica menor de $3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y los nutrimentos disociados en iones, los cuales deben mantener las relaciones correctas que eviten precipitados y antagonismo. Estas condiciones deben prevalecer en el sistema radical de

la raíz, sin embargo la competencia, antagonismo y sinergismo entre los iones modifican las tasas de consumo, la planta también modifica su consumo de nutrimentos en función de sus diferentes fases de crecimiento, condiciones climáticas (temperatura, intensidad y calidad de luz y humedad relativa), carga de fruta, conductividad eléctrica, cantidad de oxígeno disuelto en la solución nutritiva, flujo de la solución nutritiva y pH (Sonneveld y Voogt, 2009a; Jones, 2005a; Terabayashi, 2004), con ello las proporciones y concentraciones de los iones en el ambiente de la raíz también se modifican, pero ello se corrige de manera eficiente generando en cada riego un drenaje que puede ser del 10 a 30 % (Lieth y Oki, 2008).

Cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero, al sistema hidropónico se le conoce como sistema abierto, por el contrario, si se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste del pH, conductividad eléctrica (CE) y nutrientes, se le llama sistema cerrado.

También es importante resaltar que el agua es uno de los recursos naturales cada vez más limitados, por lo que es importante buscar sistemas de producción en el que se haga más eficiente su uso para la producción de alimentos. Asimismo, los fertilizantes cada vez son más caros (Huang, 2009) y representan un importante porcentaje del costo de producción (Lamas, 2011). En este sentido los sistemas cerrados (recirculación de la solución nutritiva) presentan ventajas importantes, respecto a los sistemas abiertos como las siguientes: ahorro de agua y fertilizantes, menor impacto ambiental al evitar que grandes cantidades de nitrógeno y fósforo lleguen a ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Páez *et al.*, 2007; Giuffrida y Leonardi, 2009; Nakano *et al.*, 2010; Massa *et al.*, 2010;

Byrnes, 1990; Pardossi *et al.*, 2009). Las desventajas son: el incremento de la conductividad eléctrica, desbalance de la solución nutritiva y el mayor riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz (Tüzel *et al.*, 2009; Massa *et al.*, 2010; Van Os, 2009).

El desbalance de la solución nutritiva se genera por la presencia en exceso de aquellos iones menos consumidos por la planta (SO_4^{2-}), lo que rompe el equilibrio de nutrientes y en la mayoría de las veces incrementa la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento (Savvas *et al.*, 2009; Zekki *et al.*, 1996; Giuffrida *et al.*, 2009), situación que se hace más crítica con contenidos de Na^+ y Cl^- en el agua, limitando el recirculado de la solución nutritiva.

Para tratar de resolver este problema, se ha propuesto: renovar la solución nutritiva hasta que haya alcanzado una CE de $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Dasgan y Ekici, 2005); usar la solución nutritiva a 70 % de su concentración (Parente *et al.*, 2010); compensar el agua transpirada con solución nutritiva normal hasta que la CE llegue a $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, reponer el agua transpirada con agua simple hasta que la concentración de N-NO_3^- baje a $1.0 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$, compensar el agua transpirada con solución nutritiva normal hasta que la CE se incremente a $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y que la concentración de N-NO_3^- baje a $1.0 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ (Massa *et al.*, 2010); adicionar todos los nutrientes de manera diaria con base en el consumo estimado previamente (Nakano *et al.*, 2010) o no desechar la solución nutritiva y dejar que la CE se incremente (Savvas *et al.*, 2009).

Las investigaciones antes mencionadas utilizaron varios sistemas de producción en el que mientras se cosecha, en la planta existe una etapa vegetativa y reproductiva (floración), esta últimas es la más afectadas cuando la CE se eleva. Por ello, en un

sistema cerrado es fundamental mantener una CE correcta a lo largo del ciclo, que en tomate puede ser de 11 meses, lo cual resulta técnicamente muy complicado para los productores. Además debido al ciclo tan largo se tiene las plantas están expuestas por más tiempo a la presencia de enfermedades.

Para que los sistemas cerrados se puedan implementar con éxito, se debe hacer más sencillo su manejo sin que se pierda el control, manteniendo un alto rendimiento y calidad. Un método que permitiría esto sería hacer ciclos de cultivo cortos. Al respecto, en la Universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema de producción que consiste en hacer trasplantes tardíos (hasta de 60 días después de la siembra), despuentes de las plantas por encima de la primera, segunda o tercera inflorescencia, eliminando los brotes laterales y usando altas densidades de población (18, 12 y 8 plantas·m⁻² con uno dos o tres racimos respectivamente), con ello es posible producir 12 a 16 kg m⁻² en un ciclo de 70 a 90 días de trasplante a fin de cosecha; según si el nivel de despunte es a uno, dos o tres racimos por planta (Sánchez y Corona, 1994; Sánchez y Ponce, 1998; Ucan *et al.*, 2005; Sánchez *et al.*, 2010).

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue valorar la factibilidad de utilizar sistemas hidropónicos cerrados, que otorguen al menos el mismo rendimiento y calidad que los sistemas hidropónicos abiertos, mediante el acortamiento del ciclo de cultivo de jitomate al manejarlo con el sistema de despunte a tres racimos por planta en alta densidad y así obtener los beneficios de los sistemas cerrados, minimizando sus riesgos y facilitando su manejo.

1.1 Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de recircular la solución nutritiva sobre el crecimiento de plantas de tomate manejadas a tres racimos.
2. Determinar el ahorro de agua y elementos nutritivos primarios que se logra al recircular la solución nutritiva.
3. Determinar en el tiempo, el consumo aparente de los elementos nutritivos, monitoreando la solución nutritiva recirculante.
4. Comparar el rendimiento en los sistemas hidropónicos abiertos respecto a los sistemas cerrados.

1.2 Hipótesis

1. Cuando se manejan en ciclo corto, el comportamiento del crecimiento y rendimiento de las plantas de tomate es igual en un sistema hidropónico cerrado respecto a un abierto.
2. Existe menor uso de agua y elementos nutritivos primarios cuando se reutiliza la solución nutritiva drenada.
3. El consumo de elementos nutritivos primarios es similar entre los diferentes sistemas hidropónicos cerrados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Agricultura protegida en México

La horticultura protegida se define como el sistema de producción que permite modificar el ambiente natural en el que se desarrollan las plantas de cultivo, con el propósito de alcanzar un crecimiento óptimo y con ello, un alto rendimiento. Este sistema permite obtener productos de alta calidad, con mejores precios de venta y con mayores niveles de inocuidad; dentro de las técnicas y sistemas de producción que constituyen la horticultura protegida se pueden mencionar la fertirrigación, el acolchamiento del suelo, el uso de cubiertas flotantes, la producción basada en estructuras de protección como microtúneles, túneles bajos e invernaderos, y el cultivo de plantas sin suelo o hidroponía (Sánchez y Escalante, 1998; Urrestarazu, 2004).

Con la tecnología hidropónica, y el uso de invernaderos, el sistema radical y la parte aérea de la planta crecen en condiciones poco restrictivas de luz, temperatura, agua y nutrientes minerales, lo que hace posible la producción de cualquier especie hortícola en periodos del año donde difícilmente se produciría a campo abierto (Wittwer y Castilla, 1995; Jensen, 2002).

En México existen diferentes tipos de clima en los que se puede producir bajo condiciones protegidas, por lo que cada región tiene sus propias demandas de tecnologías e infraestructura, así por ejemplo las regiones de Baja California, Sinaloa y Sonora se están distinguiendo por su crecimiento en estructuras de producción llamadas casas sombra o malla sombra, dado que sus condiciones climáticas les permiten producir en el invierno bajo condiciones de suelo, con bajos costos de producción. Mientras que

en la región central del país está creciendo el invernadero multitúnel automatizado, principalmente bajo condiciones hidropónicas (Castellanos y Borbón, 2009).

Entendiéndose como agricultura protegida a los diferentes tipos de invernaderos y malla sombra, la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C. (AMHPAC, 2010) estima un inventario de 15,000 has de las cuales 6,300 has se ubican en los estados del noroeste del país como Baja California, Sonora, Sinaloa y Jalisco.

2.2 Importancia económica del tomate

A nivel mundial los principales países productores de tomate se muestran en la Cuadro 1. En México el tomate es considerado una hortaliza de gran valor económico, generadora de empleos y divisas. En la temporada 2008-2009 se cosecharon 52,383 ha. Como producto de exportación en el mismo periodo se reporta un valor de 929.6 millones de dólares en un volumen de 888,579 toneladas (CNPH, 2009). El principal mercado de exportación es E.U.A seguido de Canadá, ello porque el invierno en estos países limita su producción, situación que han aprovechado los productores Mexicanos (Cook y Calvin, 2005). Durante la temporada 2008-2009 los productores concentraron 65 % de las exportaciones en los meses de Enero a Abril (CNPH, 2009).

Cuadro 1. Principales países productores de tomate en el 2008

Lugar	País	Producción (Ton)
1	China	33,911,702
2	E.U.A	13,718,171
3	India	10,303,000
4	Turquía	10,985,355
5	Egipto	9,204,097
6	Italia	5,976,912
7	Irán	4,826,396
8	Brasil	3,867,655
9	España	3,922,500
10	México	2,936,773

FAOSTAT, 2011.

2.3 Generalidades del tomate

Hace unos años el nombre científico del tomate era *Lycopersicon esculentum* Mill. el cual fue dado por el botánico escocés Philip Miller, en los años 1760s; en la actualidad con la secuenciación del DNA y los estudios phylogénéticos ubican a la planta de tomate con el nombre de *Solanum lycopersicum* L. (Spooner, *et al.*, 1993; Asamizu y Ezura, 2009).

El tomate es una planta dicotiledónea que pertenece a la familia Solanaceae; presenta un tallo principal que en los primeros días de crecimientos permanece erecto, después en cada axila de las hojas aparece un brote (Peralta y Spooner, 2000).

El sistema radical del tomate consta de una raíz principal y gran cantidad de ramificaciones secundarias; cuando la planta se desarrolla a partir de una semilla, sin trasplante, se forma una raíz principal que puede llegar a penetrar más de tres metros en terrenos aluviales profundos (Chamarro, 1995), aunque es en los primeros 30 cm de la capa de suelo donde se concentra 70 % de la biomasa radical. El sistema radical tiene como funciones la absorción y el transporte de agua y nutrientes, así como la sujeción o anclaje de la planta al suelo (Muñoz, 2009).

El tallo típico es cilíndrico en plantas jóvenes y anguloso en plantas maduras, tiene de 2 a 4 cm de diámetro en la base y está cubierto por pelos glandulares y no glandulares que salen de la epidermis. En el extremo del tallo principal se encuentra el meristemo o yema apical, una región de división celular activa donde se inicia los nuevos primordios foliares y florales. Según el hábito de crecimiento, existen cultivares de crecimiento determinado e indeterminado; en los primeros el crecimiento aparente del tallo principal se interrumpe al finalizar en una inflorescencia sin yema axilar (ni hoja) que lo prolongue (Chamarro, 1995; Castilla, 1995).

Las hojas están formadas por folíolos con bordes dentados, tienen un eje central o peciolo que se utiliza para el monitoreo nutricional. Una hoja típica de tomate alcanza hasta 50 cm de largo, con un gran folíolo terminal y hasta 8 folíolos laterales. (Muñoz, 2009). La epidermis del envés contiene abundantes estomas que facilitan el intercambio gaseoso con el exterior, mientras que éstos son escasos en la epidermis superior. La iniciación de las hojas se produce a intervalos de 2 a 3 días (Chamarro, 1995).

El racimo floral o inflorescencia está compuesto de varios ejes; la flor es perfecta, regular e hipógina y consta de 5 o más sépalos, 5 o más pétalos dispuestos de forma helicoidal a intervalos de 135° , de 5 estambres que se alternan con los pétalos y de un ovario bi o plurilocular. La diferenciación floral suele iniciarse dentro de las tres semanas siguientes a la expansión de los cotiledones (periodo cuando la planta está en el almácigo) y durante las primeras fases del inicio de la primera inflorescencia inicia la segunda. Después del inicio de las flores, su velocidad de crecimiento y desarrollo, así como el aborto de las yemas florales, están influidos por las condiciones ambientales (Chamarro, 1995). En cultivares de crecimiento indeterminado la primera inflorescencia suele aparecer tras la 7ª a 11ª hoja, posteriormente suele alternarse con otra inflorescencia cada tres hojas; en cultivares determinados o semi-determinados la inflorescencia aparece normalmente tras la 5ª a 7ª hoja y se alterna con 1 ó 2 hojas, aunque las condiciones ambientales pueden alterar estos patrones (Castilla, 1995).

La fecundación de los óvulos marca el inicio del crecimiento del fruto. En la fecundación se pueden distinguir las siguientes etapas: formación del grano de polen, polinización y fecundación. Completadas estas etapas da paso a la formación del fruto. El fruto del tomate está constituido básicamente por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas. El tamaño final del fruto está estrechamente correlacionado con el

número de semillas y el número de lóculos, por lo que una buena fecundación es indispensable para tener frutos bien formados. Tanto el tamaño como el contenido de sólido solubles del fruto depende de los fotoasimilados recibidos de las hojas. El tiempo necesario para que un ovario fecundado se desarrolle a un fruto maduro es de 7 a 9 semanas, en función del cultivar, la posición del racimo y las condiciones ambientales. Los cultivares comerciales de tomate crecen a partir de un ovario de 5 a 10 mg y alcanzan, en la madurez, un peso de 5 a 500 g en función de la variedad y de las condiciones de desarrollo (Chamarro, 1995).

2.4 Necesidades climáticas del tomate

2.4.1 Temperatura

La planta de tomate prefiere el clima cálido, ya que las temperaturas del aire menores a 10 °C demoran la germinación de las semillas, inhiben el desarrollo vegetativo, reducen el crecimiento y la maduración del fruto; la planta de tomate no tolera heladas. Con temperaturas superiores a 35 °C se reduce el cuajado y se inhiben el desarrollo normal de color. El rango de temperatura de aire óptima para el crecimiento normal de la planta se encuentra entre 21 y 30 °C, en el día y 18.5 a 21 °C, en la noche. La temperatura base durante el día, por debajo de la cual el crecimiento es insignificante, se establece en 10.5 °C (Jones, 2008). A nivel radical la temperatura óptima se encuentra en el rango de 20 a 25 °C (Chong e Ito, 1982; Ikeda y Osawa, 1988).

2.4.2 Luz

La luz es la parte visible (390 a 760 nm) de la radiación solar y es el factor más importante que afecta la productividad en los sistemas de cultivos protegidos; en las plantas las longitudes de 400 a 700 nm son las idóneas para el proceso de fotosíntesis y

se le conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR) y las mediciones se expresan como densidad del flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) y sus unidades son $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Sus componentes son la calidad, cantidad, intensidad y fotoperiodo. La eficacia con que las hojas interceptan la luz depende de su área foliar, disposición y ángulo con que crecen las hojas en la planta; así, manipulando su densidad (o acomodo de las plantas) se logra interceptar la mayor cantidad de PPFD (Papadopoulos y Pararajasingham, 1997); y con ello mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

Ucán *et al.* (2005) trabajando con plantas despuntadas a tres racimos y densidades de 6 a 12 plantas·m⁻² dedujeron que el aumento de la densidad de plantas no reduce el rendimiento por unidad de superficie, probablemente porque el índice de área foliar (IAF, área total de la superficie superior de las hojas por área de unidad de terreno que se encuentre directamente debajo de la planta; m⁻²·m⁻²) también aumentó, lo que incrementó el porcentaje de radiación y la fotosíntesis total del dosel. Sin embargo el peso promedio de fruto disminuyó 27 % al aumentar la densidad, por lo tanto, si las densidades o, mejor dicho, si el IAF es muy alto el beneficio se puede perder por efecto de altas densidades.

2.4.3 Humedad relativa

Para el cultivo de tomate, humedades relativas del aire inferior a 90 % son deseables, pues valores superiores favorecen el desarrollo de enfermedades criptogámas, siendo óptimos valores de 70 a 80 %, incluso con temperaturas del aire bajas durante la noche. En condiciones de baja humedad relativa, la tasa de transpiración crece, lo que puede acarrear, especialmente en fase de fructificación cuando la actividad radical es menor,

estrés hídrico, cierre de estomas y reducción en la formación de fotoasimilados (Castilla, 1995).

2.4.4 Agua

El agua constituye la mayor parte de la materia vegetal y por ello puede ser uno de los factores limitantes de la producción agrícola; de la disponibilidad de agua para la planta depende, en gran parte el resultado del cultivo (Salas y Urrestarazu, 2000). El riego localizado es la manera más usada para suministrar los requerimientos de agua y elementos nutritivos a la planta. Las plantas usan su sistema radical para tomar el agua que se pierde por los estomas en forma de vapor (transpiración), por lo tanto las condiciones y el medio en el que crecen sus raíces afecta la respuesta de la planta en situaciones de estrés hídrico. En general las plantas que crecen a campo abierto son menos afectadas por periodos cortos de estrés hídrico que las plantas en invernadero o malla sombra (Jones, 2005a).

2.5 Cultivo de tomate en sistemas protegidos

La superficie total sembrada de tomates ha mostrado una tendencia a disminuir. En 1990, la superficie plantada fue aproximadamente de 85,500 hectáreas. Sin embargo, en 2000 la superficie plantada fue aproximadamente de 75,800 hectáreas y para 2010 la superficie plantada se espera cerca de 58,300 hectáreas. A pesar de la menor área sembrada, los rendimientos de producción han aumentado debido a los avances tecnológicos y en especial con el uso de la agricultura protegida (invernaderos y casa sombras) (Flores y Ford, 2010b).

2.5.1 Problemas del suelo con la producción intensiva

El suelo llega a ser una limitante en la producción intensiva bajo invernadero y malla sombra. En estos sistemas se origina gran presión y facilidad para el establecimiento de patógenos con forme pasan los ciclos de cultivo (Takahashi, 1984). Asimismo la acumulación de sales que se presenta con frecuencia en la producción intensiva de hortalizas, afecta el rendimiento del cultivo por la pérdida las propiedades químicas y físicas aptas para la producción (Liang *et al.*, 2006; Blanco y Folegatti, 2002). Además zonas donde existen condiciones climáticas favorables para el establecimiento de cultivos protegidos, las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo no son las correctas para cultivarse. Ante estos problemas, la hidroponía se presenta como alternativa.

2.6 Hidroponía

Sánchez y Escalante (1988), define a la hidroponía como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas son irrigadas con una solución de elementos nutritivos esenciales disueltos en agua y, en el que en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material inerte y estéril o incluso la misma solución de nutrientes (llamada también solución nutritiva); con el objetivo de poner el ambiente de la raíz en las mejores condiciones posibles para que ésta cumpla con sus funciones de nutrir a la parte aérea con agua, nutrientes y hormonas vegetales de manera óptima.

2.7 Solución nutritiva

Una solución nutritiva es una solución acuosa que contiene oxígeno disuelto y todos los nutrientes en forma de iones. Los nutrientes son aportados como fertilizantes

comerciales. La relación entre los nutrientes, la concentración total de los mismos, la conductividad eléctrica y el pH de la solución es lo que conforman la “solución ideal” (Muñoz-Ramos, 2003).

Dado que en los sistemas hidropónicos la solución nutritiva es muy importante, su composición y suministro se monitorea de manera constante. A excepción del carbono y oxígeno, que son absorbidos principalmente por la parte aérea de la planta, el resto de los nutrientes esenciales se suministran disueltos en la solución nutritiva y se absorben en las membranas de las células de las raíces de manera activa. De esta forma, la planta selecciona y acumula los iones a pesar de un gradiente electroquímico y menor concentración del exterior. Para su preparación Steiner (1961) considera: 1) la concentración iónica total; 2) el pH; 3) y la proporción de cationes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (NO_3^- , $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-}) y sugiere que la mayoría de las plantas crecerían muy bien con las proporciones entre cationes y entre aniones siguientes:

N- NO_3^-	50 a 70 %	de los aniones
P- $H_2PO_4^-$	3 a 20 %	de los aniones
S- SO_4^{2-}	25 a 40 %	de los aniones
K^+	30 a 40 %	de los cationes
Ca^{2+}	35 a 55 %	de los cationes
Mg^{2+}	15 a 30 %	de los cationes

El pH en la solución nutritiva afecta las reacciones de disociación y precipitación de los iones. Generalmente el pH de la solución está en función de las concentraciones de los iones $H_2PO_4^-$, NH_4^+ y HCO_3^- ; los dos primeros son ácidos débiles, mientras que el HCO_3^- es una base débil (De Rijck y Scherevens, 1997a; De Rijck y Scherevens, 1997b). El pH correcto en una solución nutritiva es de 5.5 a 6.5. En este rango se ha visto una respuesta positiva en el rendimiento de pepino, tomate, clavel y rosa

(Sonneveled y Voogt, 2009a). En los sistemas hidropónicos cerrados como en los abiertos el pH en la solución nutritiva varía en función de la absorción nutrimental, calidad del agua y fuente nitrogenada utilizada. Como consecuencia de las diferencias en la relación de absorción de cationes y de aniones, la asimilación del nitrógeno y la estabilización del pH de la solución nutritiva se altera cuando el nitrógeno se suministra como NO_3^- o NH_4^+ (Marschner, 1995).

La competencia, antagonismo y sinergismo entre los iones modifican las tasas de consumo. Por ejemplo, los iones monovalentes (K^+ , Cl^- , NO_3^-) se absorben más fácilmente que los iones divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}); la presencia de N-NO_3^- favorece la absorción de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , mientras que si predomina el N-NH_4^+ el consumo de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se reduce. Si la presencia del ion Cl^- es considerable se restringe la absorción de N-NO_3^- (Sonneveled y Voogt, 2009b; Jones, 2005a).

La planta también modifica su consumo en sus diferentes fases de crecimiento, condiciones climáticas (temperatura, intensidad y calidad de luz, humedad relativa), carga de fruta, CE, cantidad de oxígeno disuelto en la solución nutritiva, flujo de la solución nutritiva, pH, etc., con ello las proporciones y concentraciones de los iones en la solución nutritiva en los sistemas cerrados se modifican, y por ello la importancia de monitorear la solución recirculante. Terabayashi *et al.* (2004), señalan que la tasa de consumo de NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} fue superior en el periodo de floración a la cosecha del primer racimo, después de ello se redujo; lo atribuyó a la reducción del crecimiento vegetativo provocado por la remoción del ápice de crecimiento en el tercer racimo y menor demanda de los frutos resultado de la cosecha.

2.7.1 Sustrato

Un sustrato de cultivo es un medio material en el que se desarrollan las raíces de las plantas, limitado físicamente en su volumen, aislado del suelo para impedir el desarrollo de las raíces en el mismo y capaz de proporcionar, a la planta el agua y los elementos nutritivos que demande, y a las raíces el oxígeno necesario para su respiración (Martínez y García, 1993). En México, la roca volcánica conocida como tezontle es ampliamente utilizado como sustrato para la producción de hortalizas y flores en cultivos sin suelo (Vargas *et al.*, 2008).

En los sistemas hidropónicos es común el uso de sustratos (material sólido), pero existe la opción de establecer las plantas sin ningún anclaje sólido en el cual se desarrolla el sistema radical. Algunos ejemplos son: técnica de la película nutritiva o nutrient film technique (NFT), new growing system (NGS), hidroponía de flujo profundo (raíz flotante en solución nutritiva) o deep flow technique (DFT) (Urrestarazu, 2000).

En la producción intensiva de hortalizas de fruto estos sistemas son menos utilizados, los cultivos de ciclo corto han sido los más adoptados, en especial hortalizas de hoja (lechuga). Sin embargo son alternativas para la producción de hortalizas de alta calidad. En estos sistemas la constante oferta de agua y elementos minerales permite a las plantas crecer sin estrés, precocidad y obtener el potencial productivo del cultivo. En cultivos de ciclo largo se señala como uno de los principales problemas el bajo contenido de oxígeno en la solución nutritiva que reduce el crecimiento radical (Gislerød y Kempton, 1983).

2.7.2 Sistema abierto y sistema cerrado

Hay dos sistemas básicos de utilizar la solución nutritiva:

- Un sistema "abierto" en el que pasa la solución nutritiva a través de las raíces y el drenaje que se genera se desecha.
- Un sistema "cerrado" en el que pasa la solución nutritiva a través de las raíces y el drenaje se reutiliza.

Ambos sistemas tienen sus ventajas y desventajas. En el sistema abierto la mayor desventaja es la pérdida de agua y fertilizantes (Jones, 2005b). Un sistema hidropónico que permita bajar los costos de producción en el rubro de fertilizantes ayudaría a elevar las ganancias. De los costos totales de operación, los fertilizantes pueden llegar a representar 9.3 % en una empresa con media y alta tecnología (nivel de inversión de \$90 a 53 $\text{usd}\cdot\text{m}^{-2}$) y 20.3 % en una empresa con baja tecnología (nivel de inversión de < \$37 $\text{usd}\cdot\text{m}^{-2}$) (Lamas, 2011).

También el hecho de eliminar los drenajes provoca contaminación al medio ambiente. El impacto ambiental generado al descargar el drenaje de los invernaderos con demasiado fertilizante en los ecosistemas está generando en distintos países legislaciones para reducir las concentraciones antes de poder eliminarlos (Massa *et al.*, 2010; Byrnes, 1990) e incentivan a hacer un uso sustentable del agua (Van der Velde *et al.*, 2008). En México, de acuerdo con Páez *et al.* (2007) las descargas de nitrógeno y fósforo contaminan de forma excesiva ríos, lagos, embalses y lagunas costeras incrementando la biomasa algal, que al morir produce periodos de disminución del oxígeno (hipoxia y anoxia) con múltiples consecuencias en los ecosistemas. También al lixivarse en los suelos estos fertilizantes pueden contaminar mantos freáticos.

En los sistemas de cultivo sin suelo, el reciclaje y el uso de la concentración óptima mínima de nutrientes pueden reducir sustancialmente la contaminación. Ajustar la concentración con el consumo es necesario para aumentar la eficiencia del uso del agua y fertilizantes sin perder los niveles de calidad y rendimiento. En el Cuadro 2 se exponen las concentraciones de los diferentes nutrientes cuando se ha reutilizado la solución nutritiva (sistemas cerrados).

En investigaciones recientes se están usando soluciones nutritivas a concentraciones bajas, buscando determinar los niveles mínimos de suficiencia (Giuffrida y Leonardi, 2009; Nakano *et al.*, 2010) y de esta forma cumplir con la legislación de algunos países Europeos que señala un máximo de $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de N en los drenajes antes de verterlos al medio ambiente (Massa *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Diferentes concentraciones de la solución nutritiva (SN) usada en sistemas cerrados reportada por diversos autores.

Autor	CATIONES mg·L ⁻¹					ANIONES mg·L ⁻¹			
	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
Parra <i>et al.</i>, 2009	214.5	132.0	57.6	-	108.1	112.0	-	86.4	216.6
Giuffrida <i>et al.</i>, 2003	206.7	52.0	11.2	4.2	-	105.0	34.1	28.8	-
Tüzel y Meriç, 2001	250.0	150.0	50.0	-	-	210.0	40.0	-	-
Alarcón, <i>et al.</i>, 2001	281.0- 613.9	260.0- 388.0	57.2- 120.0	-	-	175- 340.2	37.2- 108.5	37.6- 252.8	-
Giuffrida y Leonardi, 2009 SN al 100 %	237.9	64.0	12.6	9.8	-	126.0	46.5	28.8	-
SN al 60 %	142.7	38.4	7.6	5.9	-	75.6	27.9	17.3	-
Dasgan y Ekici, 2005									
0-119 días	110.0	150.0	40.0	9.5	33.2	128.0	49.3	53.0	81.5
120-147 días	298.0	150.0	60.0	25.0	33.2	20.0	39.1	79.0	81.5
148-203 días	304.0	200.0	60.0	44.0	33.2	212.0	68.2	79.0	81.5
Exp 1 y 2 etapa vegetativa	370.5	180.0	19.2	-	-	168.0	40.3	-	-
Exp 1 y 2 etapa reproductiva	183.3	128.0	19.2	-	-	98.0	21.7	-	-
Exp 3	273.0	180.0	19.2	8.4	230 y 460	168.0	40.3	-	-
Nakano <i>et al.</i>, 2010									
CE I/II	156.0	60.0	28.0	8.4	-	100.8	61.8	32.0	-
CE III	156.0	60.0	28.0	0.0	-	102.2	61.8	28.8	-
Concentración I	140.4	58.0	26.6	8.4	-	85.4	61.8	36.8	7.1
Concentración II	152.1	52.0	25.2	8.4	-	85.4	61.8	36.8	7.1
Concentración III	152.1	52.0	25.2	-	-	85.4	61.8	25.6	7.1
Oztekin <i>et al.</i>, 2008	250.0	150.0	50.0	-	-	210.0	40.0	-	-
Tüzel <i>et al.</i>, 2001 inicio - 3 racimo	250.0	150.0	50.0	-	-	210.0	40.0	-	-
3 Racimo - final	300.0	150.0	50.0	-	-	240.0	40.0	-	-

De manera general el reciclaje de la solución nutritiva en los sistemas hidropónicos cerrados con sustrato, NFT y NGS consiste en coleccionar el drenaje de los riegos en canales y conducirlo por gravedad a un depósito por debajo del nivel del suelo. Posteriormente con una bomba pasar la solución drenada por un sistema de filtros y desinfectarla (generalmente se usan lámparas UV). Después se lleva la solución a un

depósito donde se analiza químicamente y se ajusta la concentración y balance de los elementos. Se presenta la opción de mezclar la solución drenada con agua normal o solución nutritiva antes de usarse nuevamente en el cultivo (Bar-Yosef, 2008).

Las principales desventajas cuando se recircula la solución nutritiva, son: el incremento de la conductividad eléctrica, desbalance de la solución nutritiva y el riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz.

El desbalance de la solución se puede presentar en un sistema abierto o cerrado, ello porque el consumo de iones por parte de la planta difiere de las proporciones en que estos se encuentran en la solución nutritiva; sin embargo mantener los balances correctos de nutrientes en el ambiente de la raíz es relativamente fácil en un sistema abierto; el regar con solución nutritiva nueva facilita sustituir los iones y agua consumidos por el cultivo y desplazar los elementos que se estén acumulando, es decir, los menos consumidos. Por otro parte en un sistema cerrado el agua y los iones consumidos se deben reponer mientras los menos demandados por la planta se acumulan, alterando la solución nutritiva y en la mayoría de las veces aumentando la conductividad eléctrica (Oztekin *et al.*, 2008; Dasgan y Ekici, 2005; López *et al.*, 2003).

La conductividad eléctrica (CE) es un parámetro que mide la cantidad de sales disueltas en el agua (Lieth y Oki, 2008), es decir su concentración iónica total y se expresa en unidades de $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ o $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Existen muchas sales que pueden ser nocivas mientras que otras son nutrientes para las plantas, virtualmente todas las aguas contienen alguna cantidad de sales. En México existen regiones donde la disponibilidad de agua en cantidad suficiente y calidad aceptable es poca y a pesar de ello se está desarrollando la agricultura protegida (Castellanos *et al.* 2002). Por ello la calidad del agua en los

sistemas hidropónicos es muy importante. En localidades con buena calidad de agua es más sencillo implementar sistemas cerrados.

Hao y Papadopoulos (2002) mencionan que la baja concentración de Na^+ y Cl^- del agua de riego permitió cultivar tomate durante un ciclo completo (7 meses), usando como sustrato la lana de roca sin necesidad de sustituir la solución nutritiva recirculante por una nueva. Por el contrario regiones con problemas de sales en el agua se enfocan a estudiar los efectos en el cultivo de la progresiva concentración de Na^+ y Cl^- . Tunali *et al.* (2009), señalan que a pesar de remplazar la solución nutritiva cuando ésta llegaba a $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en un sistema cerrado, el rendimiento de tomate se redujo 24 % en otoño y 32 % en primavera. Savvas *et al.* (2009) en un cultivo de pimientos reportan una reducción del rendimiento, disminución de la actividad fotosintética así como menor concentración de Ca y K en las hojas y Mg en el fruto.

Montesano *et al.* (2010) también usaron agua salina en un experimento en donde evaluaron la solución nutritiva 70 y 100 % de su concentración; con la primera mencionan que el rendimiento es el mismo comparado con un sistema abierto; además señala que cuando se uso la solución nutritiva 100 % las plantas de tomate fueron sobre fertilizadas con K y N lo que originó una acumulación de estos en el sustrato. De forma similar, Giuffrida y Leonardi (2009) usaron la solución nutritiva 60 %, ello redujo la materia seca de la parte aérea mientras que el rendimiento no se afectó.

2.7.3 Ventajas del sistema cerrado

Los trabajos de investigación en sistemas cerrados son reiterativos al señalar las ventajas de este sistema como es el ahorro de agua y fertilizante, y discrepan en definir si este sistema afecta o no el rendimiento (Cuadro 3).

2.7.3.1 Ahorro de agua

Parra *et al.* (2009) mencionan que el ahorro de agua al usar diferentes sustratos fue de 32, 45 y 39 % en lana de roca, toba volcánica y fibra de coco, respectivamente. Giuffrida *et al.* (2003) señalan que al restituir parcial o totalmente la solución nutritiva el ahorro fue de 61 y 51 %, respectivamente. Dhakal *et al.* (2005) reportan ahorros en el consumo de agua de 31.5 %. Tüzel *et al.* (2001) ahorraron en un sistema cerrado de 20 a 24 %. Alarcón *et al.* (2001) reportan un ahorro de 50 % y recientemente Giuffrida y Leonardi (2009) trabajando con dos concentraciones de solución nutritiva balanceada mencionan un incremento notable en el uso eficiente del agua.

2.7.3.2 Ahorro de fertilizantes

La estrategia general del cultivo bajo un sistema hidropónico abierto se basa en el suministro de un exceso de nutrientes en relación con las necesidades estimadas de la planta para una buena cosecha; ello genera consecuencias negativas para el medio ambiente y una menor eficiencia del sistema de cultivo. En numerosos trabajos de investigación usando sistemas hidropónicos cerrados se han señalado importantes ahorros en el uso del agua y fertilizantes.

Parra *et al.* (2009), reportan ahorro en nitrógeno de 44 a 57 %, fosforo de 24 a 38 % y potasio de 47 a 57 %; por su parte Tüzel *et al.* (2001) al trabajar en los ciclos otoño y

primavera, menciona ahorros de 87 a 89, 53 a 74, 82 a 85, 81 a 85 y 72 a 84 % en nitrógeno, fosforo, potasio calcio y magnesio, respectivamente. Dhakal *et al.* (2005) señalan un menor uso de nitrógeno, fósforo, potasio y calcio de 29, 31, 29 y 28 %, respectivamente. Alarcón *et al.* (2001) indican un ahorro en 50 % en nitrógeno, fósforo y potasio. Giuffrida y Leonardi (2009) reportan un ahorro considerable al usar la solución nutritiva a 60 % sin reducción en rendimiento, manteniendo un drenaje de 80 %.

Cuadro 3. Comparación de trabajos en el ahorro de agua y fertilizantes, y su efecto en el rendimiento usando sistemas cerrados con diferentes sustratos en plantas de tomate.

Autor	Sustrato	Ahorro de agua %	Ahorro en fertilizantes %				Efecto en el rendimiento %
			N	P	K	Ca	
Parra <i>et al.</i> , 2009	lana de roca	32	47-57	24-38	47-57	-	-7
	toba volcánica	45					-15
	fibra de coco	39					-19
Giuffrida <i>et al.</i> , 2003	arcilla expandida	51-61	ahorro considerable			-	-15
Dhakal <i>et al.</i> , 2005	suelo modificado	31.5	29	31	29	28	similares
Tüzel <i>et al.</i> , 2001	perlita	20-24	87-89	53-74	82-85	81-85	no diferencia
	toba volcánica						
	perlita + peatmoss						
	toba volcanica + peatmoss						
Alarcón <i>et al.</i> , 2001	perlita	50	50			-	-
Giuffrida y Leonard, 2009	perlita	-	81	72	79	-	no diferencia
Dasgan y Ekici, 2005	perlita	36	-	-	-	-	-12
Pardossi <i>et al.</i> , 2009	lana de roca		-	-	-	-	poca diferencia
Nakano <i>et al.</i> , 2010	lana de roca	-	30-37				no diferencia
Tüzel <i>et al.</i> , 2002	toba volcánica	10.7-34.3	-				no diferencia
	perlita						
	perlita + peatmoss						
	perlita + peatmoss						
Pellicer <i>et al.</i> , 2007	perlita	27.5	-	-	-	-	no diferencia
Oztekin <i>et al.</i> , 2008	perlita	-	31.3-90.6	86.6-62.4	88.9-61.6		no diferencia

2.7.3.3 Problemas en los sistemas cerrados

En cualquier sistema hidropónico la calidad del agua es de gran importancia y por ello se requiere primero un análisis químico de sus iones. En los sistemas cerrados su composición define si es factible reciclar la solución nutritiva o al menos parte de ella (Savvas *et al.*, 2007). Cuando se cultiva en sistemas protegidos, normalmente se usan híbridos de tomate de hábito indeterminado que se cultivan por varios meses para cosechar de 15 a 20 racimos por planta. Este periodo largo de cultivo es un problema en los sistemas cerrados pues dificulta conservar la solución nutritiva balanceada y la conductividad eléctrica correcta. Una estrategia que se ha buscado es desechar la solución nutritiva cuando la conductividad eléctrica se eleve demasiado (Tüzel *et al.*, 2009; Massa *et al.*, 2010). Esta estrategia se apoya en los constantes análisis químicos de la solución nutritiva recirculante; haciendo difícil su aplicación a escala comercial por la gran cantidad de análisis que se requerirían, el costo y el tiempo que ellos implica.

En el mercado existen sensores de iones selectivos que ofrecen la posibilidad de determinar en minutos la concentración del ion en la solución nutritiva. Entre las diferentes marcas existen iones selectivos de NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . Sin embargo, una desventaja es que su costo es muy elevado.

Ante la necesidad de desarrollar y valorar equipos económicos y prácticos que ayuden en la toma de decisiones, Gutiérrez *et al.* (2007) proponen el uso de una lengüeta electrónica para la supervisión de la composición nutritiva en sus iones NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Cl^- y NO_3^- . Esta aproximación de análisis químico consiste en un arreglo de sensores acoplados con una herramienta multivariada de calibración. El sistema está formado por un arreglo de ocho sensores potenciométricos basados en membranas poliméricas

(PVC). El proceso de respuesta cruzada se basa en un modelo de red neuronal artificial multicapa (ANN, artificial neural network). Según reportan, el modelo predijo la concentración de los valores de amonio, potasio, nitrato y de los compuestos salinos indeseados como sodio y cloruro en la solución nutritiva, solución drenada y el agua de riego. Los resultados mostraron una buena capacidad de predicción para los diversos iones con excepción del cloruro, donde los efectos de interferencia fuertes del nitrato no pudieron ser cuantificados. El sistema parece factible para la valoración en línea de nutrientes y de compuestos indeseados en soluciones de fertirriego.

2.7.3.4 Desinfección de la solución nutritiva

Como ya se señaló anteriormente en los sistemas cerrados existe alto riesgo de diseminar los patógenos que atacan el sistema radical (Van Os, 2009). Para reducir este peligro, la solución nutritiva debe ser tratada antes de reutilizarse y al respecto Van Os (2009) considera lo siguiente. Los productores se inclinan por aquellos métodos de desinfección de menor costo anual. Existen métodos químicos y no químicos y en función de la superficie y sistema cerrado es el desempeño de cada uno. Para cultivos mayores de 2 ha los tratamientos con calor y radiación UV son la mejor opción; para superficies menores de una ha la filtración lenta con arena es más adecuada. El ozono y el uso de membranas son buenos métodos, pero caros. El hipoclorito de sodio (NaOCl) y el peróxido de hidrógeno son relativamente baratos, pero su control de patógenos es pobre. El uso de dióxido de cloro puede ser una buena alternativa, pero existe poca información de su uso en hidroponía.

2.8 Producción de tomate basado en despunte temprano y alta densidad

En la mayoría de los invernaderos en México el sistema de cultivo para tomate consiste en usar variedades de crecimiento indeterminado y conducir la planta a un tallo con densidades de población de dos a tres plantas·m⁻² que se dejan crecer a más de tres metros de altura, para cosechar de 15 a 25 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses con rendimientos que pueden sobrepasar 300 t·ha⁻¹·año⁻¹ (Sánchez y Ponce, 1998).

Un sistema de producción alternativo desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo, se enfoca a reducir el periodo de trasplante a fin de cosecha usando trasplantes tardíos (plantas de mayor edad en contenedores de mayor volumen), despuntando tempranamente el ápice de la planta para dejar uno, dos o tres racimos por planta y estableciendo densidades de población de hasta 12 plantas·m⁻² de superficie útil (7 plantas·m⁻²) (Sánchez y Corona, 1994; Sánchez y Ponce, 1998; Ucán *et al.*, 2005; Sánchez *et al.*, 2010).

Este sistema presenta ventajas como las siguientes: las labores del cultivo como podas, tutoreo y deshoje se reducen, por lo corto del ciclo hay menor problemas con las plagas y enfermedades y con ello menor uso de agroquímicos, se programa la concentración de toda la cosecha de un ciclo, en un periodo corto de tiempo en donde exista mayor probabilidad de beneficio económico, es posible establecer tres o cuatro ciclos de cultivo con frutos de mayor calidad (Sánchez *et al.*, 1999; Ucán *et al.*, 2005; Sánchez *et al.*, 2010).

En este sistema de trasplantes tardíos, despuntes tempranos en alta densidad Sánchez *et al.* (2010) reportan un rendimiento de $2.11 \text{ kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ ($14.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$) y un peso medio de los frutos de 130 g, usando variedades de crecimiento determinado y frutos tipo bola en un periodo de transplante a fin de cosecha de 3 a 4 meses.

A demás es posible mejorar la calidad del fruto; cuando se aumenta la salinidad o el déficit de agua se mejora su sabor (acidez y contenido de azúcar). Sin embargo es común que se reduzca el rendimiento por el incremento de la incidencia de blossom and rot (BER), el cual generalmente ocurre en la etapa temprana, cuando el fruto crece rápidamente y la concentración de Ca en los tejidos decrece. Sakamoto (1999) trabajando con un cultivo de tomate en alta densidad, despuntando a un racimo por planta, señala que si la salinidad se aumenta cuando el fruto está completamente desarrollado, pero en estado verde (días antes de iniciar su color rojo) se incrementa la concentración de sólidos solubles, citrato, ácido ascórbico, K, clorofila a, clorofila b, licopeno y carotenoide sin detrimento del rendimiento.

En México no se ha encontrado información donde se relacione este sistema de producción con los sistemas con recirculación de la solución nutritiva, aspecto que enfatiza la importancia del presente trabajo.

2.9 Análisis del crecimiento vegetal

La materia seca total de la planta representa la integración espacial y temporal de todos los procesos de crecimiento y desarrollo y lo por tanto, un parámetro muy relevante de estudio. El termino análisis del crecimiento vegetal se refiere a un conjunto de métodos

cuantitativos que describen los resultados de los sistemas donde las plantas son cultivadas (Hunt, 2003).

La tasa de acumulación de materia seca varía a través del ciclo de vida de la planta que van desde días a semanas para cuantificar los efectos de las influencias del medio ambiente, para analizar las diferencias genotípicas entre variedades o relacionar la acumulación de un órgano con el consumo de nutrientes. Por ejemplo Terabayashi *et al.* (2004) señalan la relación entre peso del fruto como función de la tasa media del consumo de nutrientes y el peso seco de la parte aérea, indicando que el peso del fruto depende fuertemente del crecimiento vegetativo.

En los análisis de crecimiento básicos se genera la medición de peso seco de la planta o de algún órgano y el área foliar, y a partir de ellos se derivan un gran número de parámetros; con el análisis de crecimiento mediante el método funcional, los datos provienen de plantas con un bajo número de repeticiones pero con intervalos de tiempo cortos, con ello se puede seleccionar una función matemática adecuada que ajusta los valores registrados de área foliar y de biomasa acumulada total o de algunos órganos de manera que se aproxime a la curva real de crecimiento (Hunt, 1982). Algunos índices de eficiencia fisiológica o también llamados índices fisiotécnicos importantes se mencionan a continuación.

2.9.1 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Sus unidades son, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. Este índice indica la velocidad de crecimiento del cultivo. La TCC está estrechamente relacionada a la intercepción de radiación solar, la que a su vez depende del IAF. La TCC aumenta a medida que aumenta el IAF hasta que alcanza

un valor capaz de interceptar 95% de la radiación solar incidente. El valor óptimo de IAF con el cual el tomate alcanza su máxima TCC se ubica en $3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Sánchez *et al.* (2010) probando sistemas de producción de jitomate reportan que entre los 60 y 90 días después de siembra la TCC del cultivo fue mayor en el sistema uniforme con tres hileras, ello porque el IAF fue de $3.36 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ contra 2.37 y $2.17 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ en los sistemas escaleriforme y de imbricación, respectivamente.

2.9.2 Tasa de asimilación neta (TAN)

Sus unidades son, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. Representa la ganancia neta en materia seca por unidad de área foliar por unidad de tiempo y es una medida indirecta de la fotosíntesis (Hunt, 1982). Es conocida también como la tasa foliar unitaria y se define como el incremento de material vegetal por unidad de material asimilado por unidad de tiempo.

La TAN es también una medida de la eficiencia del follaje, la cual constituye la principal fuente de fotoasimilados para la producción de materia seca e indica también la velocidad de fotosíntesis neta en un lapso entre dos muestreos relativos largos (Escalante y Kohashi, 1993). La TAN es aplicable a una planta o a un cultivo, no es constante a través del tiempo y muestra una tendencia a disminuir con la edad de la planta. La disminución se acelera ante un ambiente desfavorable y la ganancia de materia seca por unidad de área foliar decrece en la medida en que se desarrollan nuevas hojas que pueden provocar sombreado entre ellas (Gardner *et al.*, 1990).

2.9.3 Razón de área foliar (RAF)

Sus unidades son, $\text{dm}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$. La RAF de una planta o de un cultivo equivale al área de material asimilatorio por unidad de material vegetal presente. Indica la cantidad de área

foliar producida con relación al peso seco total de la planta (Beadle, 1988; Hunt, 1982). Se expresa en unidad de área por gramo de peso seco.

2.9.4 Índice de área foliar (IAF)

Sus unidades son, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. El IAF es directamente influenciado por el área foliar y se manifiesta como la relación entre el área foliar de la planta y el área del suelo cubierta por la planta. Al inicio del cultivo el IAF es muy bajo; sin embargo, se ha demostrado que a medida que se incrementa, la intercepción de luz y la fotosíntesis neta aumenta, hasta en valor crítico más allá del cual no hay incremento de la fotosíntesis del cultivo (Heuvelink y Dorais, 2005). La intercepción de la radiación solar incidente que asegura la máxima tasa de crecimiento del cultivo, se encuentra cuando el IAF permite captar el 95 % de la radiación incidente. Algunas prácticas agronómicas tales como fertilización de arranque, altas densidades de siembra y un mejor arreglo espacial de las plantas (por ejemplo, hileras estrechas), son usadas para incrementar la intercepción de luz (Heuvelink y Dorais, 2005) y con ello establecer un IAF óptimo más pronto.

Otros índices de eficiencia fisiológica son:

Índice de cosecha (IC): es la relación que existe entre el rendimiento de la parte cosechable o rendimiento económico y la producción de biomasa total del cultivo o rendimiento biológico. Eficiencia metabólica del área foliar (EMAF, $\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$);

Para presentar los resultados de estos índices se recurre al uso de curvas, las cuales reflejan el comportamiento de la planta con respecto al tiempo. El patrón de la tasa de acumulación de materia seca se caracteriza típicamente por una curva sigmoide. Se pueden distinguir tres fases: 1) un período de crecimiento exponencial durante el

desarrollo temprano, 2) un período más o menos constante de acumulación de materia seca y 3) un período de disminución de la tasa de crecimiento de la planta durante la fase final de desarrollo debido a la senescencia y envejecimiento y por ende menor fotosíntesis en las hojas (Silber y Bar-Tal, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

La presente investigación se llevo a cabo en los invernaderos del Instituto de Horticultura (Departamento de Fitotecnia), ubicados en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México, sitio localizado a 19°29'35'' de latitud norte y 98°52'19'' longitud oeste y una altura de 2,267 msnm.

El invernadero donde se estableció el experimento es tipo capilla de dos aguas, de 42 m de largo por 10 m de ancho (420 m²), con cubierta de polietileno con 70 % de transmisión de luz. Para la ventilación cuenta con ventanas laterales protegidas con malla antiáfidos. El suelo estaba cubierto en su totalidad con fibra plástica color negro (ground cover) (Figura 1).



Figura 1. Panorámica del experimento e interior del invernadero.

3.2 Material vegetal

Se usó el híbrido comercial de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) tipo saladette ‘Juan Pablo’ de la compañía US Agriseeds® el cual presenta crecimiento indeterminado, excelente vigor y madurez de sus primeros frutos de los 70 a 75 días después del trasplante (ddt). La forma de sus frutos es cuadrada con hombros redondos y un peso de 130 a 135 g. Su largo es de 8 a 9 cm con un porcentaje alto en tamaños grande y extra grande y una extraordinaria firmeza (www.usagriseeds.com). Para el trasplante, se utilizó plántulas de 35 días, provenientes de charolas de 200 cavidades, en las que se utilizó turba (peat moss) como sustrato.

3.3 Descripción de los sistemas hidropónicos

Se probaron cinco sistemas:

1. Camas sin recirculación del drenaje (cama abierta).
2. Bolsas sin recirculación del drenaje (bolsa abierta).
3. Camas con recirculación del drenaje (cama cerrada)
4. Bolsas con recirculación del drenaje (bolsa cerrada)
5. Hidroponía de flujo profundo (Deep flow technique, DFT).

A continuación se describe en detalle cada uno de ellos.

3.3.1 Camas con recirculación y sin recirculación de drenajes

Sus dimensiones interiores fueron 1.9 m de largo por 0.9 m de ancho y 0.3 m de altura. Se construyeron haciendo el perímetro con tablas de madera de $\frac{3}{4}$ de grueso y 30 cm de alto y se fijaron entre ellas con pijas 2” $\frac{1}{2}$. Se colocaron sobre un piso con una pendiente de 3 %; en el sentido transversal a las tinajas, el piso se cubrió con ground cover. La parte

interior del cajón de madera se cubrió con plástico negro calibre 1000 dejando que sobresalieran 30 cm hacia el pasillo, formando un canal para recuperar la solución drenante (Figura 2c). Dentro del cajón de madera se depositaron 5 cm de grava de tezontle (partículas de 4 a 8 cm) para facilitar el drenaje; después 25 cm de arena de tezontle rojo (partículas de 1 a 3 mm) y se acolchó la superficie del sustrato con un polietileno color blanco la parte superior y negro la parte inferior. Para recuperar el drenaje se perforó el plástico en la parte baja de la cama y se condujo por gravedad a un pozo en el suelo donde se colocó una cubeta de 19 litros con una malla en la parte superior para evitar que se contaminara (Figura 2a y 2d). En el tratamiento de recirculación (sistema cerrado) la solución nutritiva colectada se le media su volumen, pH y CE y se condujo a un tinaco de 400 litros mientras que en el tratamiento sin recirculación (sistema abierto) se le media su volumen, pH y CE y se eliminaba fuera del invernadero.

3.3.2 Bolsas con recirculación y sin recirculación de drenajes

Bolsas de 15 litros de capacidad de color negro por dentro y blanco por fuera se instalaron sobre canales de PVC a fin de recolectar la solución drenante. Las bolsas se llenaron con arena de tezontle rojo (partículas de 1 a 3 mm). Se cuidó que los orificio de drenaje quedaran hacia el interior de los canales de PVC para que este recolectara correctamente el drenaje. Los canales se pusieron con una ligera pendiente para que el drenaje de la bolsa se dirigiera hacia una cubeta de 19 litros donde se le media su volumen, pH y CE (Figura 2b y 2d). En el tratamiento de recirculación (bolsas en sistema cerrado) la solución nutritiva que se colectada se condujo a un tinaco de 400

litros mientras que en el tratamiento sin recirculación (bolsas con sistema abierto) fue eliminada fuera del invernadero.

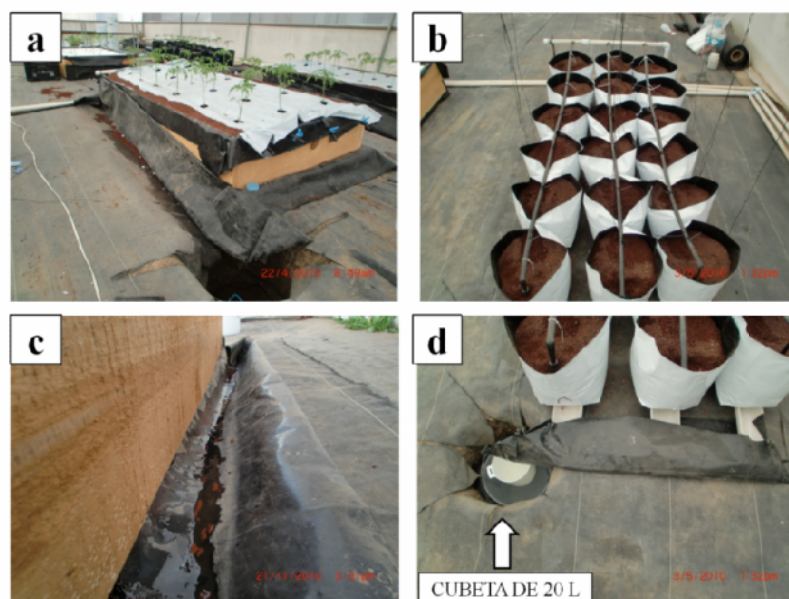


Figura 2. Camas (a) y bolsas rellenas (b) con arena de tezontle, usadas para los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva. Canal de conducción de la solución nutritiva (c) a la cubeta recolectora.

3.3.3 Deep flow technique (DFT).

Llamada también hidroponía de flujo profundo o raíz flotante en solución nutritiva, este tratamiento presentó las mismas dimensiones que el sistema en camas, pero en vez de tablas de 30 cm se usaron tablas de 35 cm de altura, 5 cm más para contener la placa de unicel (poliestireno expandido) que flotaba sobre la solución nutritiva (Figura 3b). El cajón de madera se colocó sobre el suelo del invernadero; entre el suelo del invernadero y el cajón de madera se usaron dos piezas de ground cover para evitar dañar el plástico. Por encima del ground cover el interior del cajón, se cubrió con plástico negro calibre 1000. Se prosiguió a llenar los tanques con 400 litros de solución nutritiva; se marcó el nivel del agua y se hizo un orificio a esa altura para asegurar que cuando se repusiera el agua, el volumen fuera siempre el mismo (Figura 3d). La solución nutritiva de cada tina

se oxigenaba con dos bombas de aire (Resun®, AC-9602) (Figura 3a y 3c). Se cortaron placas de unicel a la medida de la tina, su función fue sostener a las plantas y para evitar la pérdida de agua por evaporación; en el momento del trasplante las plantas se pusieron dentro de un vaso plástico pequeño, al cual se le retiró la parte inferior, con el propósito de sostener la planta y que sólo las raíces quedaran sumergidas. En este tratamiento el agua que las plantas transpiraban se restablecía todos los días al final del día.



Figura 3. Bombas de aire (a) que oxigenaban la solución nutritiva a través de pequeñas mangueras sumergidas (c). Sistema radical en el tratamiento DFT (b y d).

3.4 Manejo experimental

3.4.1 Conducción del cultivo

El trasplante se realizó el día 3 de mayo de 2010 y la última cosecha tuvo lugar el 24 de Agosto de 2010 (114 días de cultivo). Se usó una densidad de 6 plantas·m⁻²; 18 plantas por unidad experimental de 1.7 m⁻² útil, distribuidas en 3 hileras, separadas por 30 cm

entre plantas y entre hileras. El volumen de riego dependió de las condiciones climáticas y etapa de fenológica del cultivo, pero se procuraba un drenaje de 20 a 30 %.

Para mantener erectas las plantas, se manejó un sistema de tutoreo en el cual se sujetó cada planta a una cinta de rafia amarrada a un alambre sostenido de la estructura superior del invernadero. En todos los sistemas las plantas fueron despuntadas (remoción de la yema terminal del tallo principal) a los 36 días después del trasplante (ddt), dos hojas arriba de la tercera inflorescencia formada. Con este manejo, el ciclo de cultivo de trasplante a fin de cosecha duró 114 días. La composición química del agua y de la solución nutritiva usada se presenta en el Cuadro 4, y las fuentes de fertilizantes en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Composición del agua y solución nutritiva (SN).

	pH	CE (dS·m ⁻¹)	Concentración (mg·L ⁻¹)									
			K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P-H ₂ PO ₄ ⁻	S-SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
AGUA	7.61	0.2	5	22	2.43	16	0	0.74	0	11.22	10.63	0.56
SN	5.8	2.8	245	182	57.6	16	53	149	60	193.8	10.63	0.50

Cuadro 5. Fuentes fertilizante usadas para preparar y ajustar la solución nutritiva.

ÁCIDO FOSFÓRICO AL 85 % Fórmula: H ₃ PO ₄ P: 27 %; Densidad: 1.7 g·ml ⁻¹	SULFATO DE AMONIO Fórmula: (NH ₄) ₂ SO ₄ N-NH ₄ : 21.2 %
SULFATO DE POTASIO Fórmula: K ₂ SO ₄ ·7H ₂ O K: 42.75 %	SULFATO DE COBRE PENTAHIDRATADO Fórmula: CuSO ₄ ·5H ₂ O Cu: 25.5 %
SULFATO DE MAGNESIO Fórmula: MgSO ₄ ·7H ₂ O Mg: 9.64 %	TETRA BORATO DE SODIO (BORAX) Fórmula: Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O B: 2.83 %
NITRATO DE CALCIO Fórmula: Ca(NO ₃) ₂ Ca: 19.0 %; N-NH ₄ : 1.1 %; N-NO ₃ : 14.4 %	QUELATO DE HIERRO EDTA Fe
NITRATO DE POTASIO (13-2-44) Fórmula: KNO ₃ K: 35.7 %; P: 0.86 % ; N-NO ₃ : 13 %	SULFATO DE ZINC Fórmula: ZnSO ₄ ·7H ₂ O Zn: 22.6 %
	SULFATO DE MANGANESO Fórmula: MnSO ₄ ·4H ₂ O Mn: 22.6 %

Durante el desarrollo del cultivo, en el follaje se presentó cenicilla (*Leveillula taurica*), la cual se controló con Milstop plus[®] a razón de 3.5 g·L⁻¹ (bicarbonato de potasio 85 %, para uso agrícola); también se observó daño por gusano soldado (*Spodoptera exigua*), aplicándose para su control Decis[®] Forte a razón de 1 ml·L⁻¹ (deltametrina 10.7 % 100.0 g i.a. /L); las poblaciones de mosquita blanca (*Bemisia tabaco* ó *Bemisia argentifolii*) se controló con Muralla Max[®] a razón de 1.5 ml·L⁻¹ (Imidacloprid 19.6 %, 210 g i.a./L + Betacyflutrin 8.4 %, 90 g i.a./L). Al final del cultivo en una repetición del tratamiento DFT, diversas plantas presentaron síntomas de *Fusarium oxysporum*; para controlar esta enfermedad se aplicó Previcur[®] a razón de 1 ml·L⁻¹ (Propamocarb-HCl).

Se registró la temperatura máxima y mínima del día en el medio radical en cada tratamiento con un termómetro digital marca STEREN[®] modelo TER-100. La temperatura del aire y humedad relativa se registraba cada 15 minutos usando un data logger marca HOBO[®], modelo U10-003.

3.4.2 Manejo experimental de los tratamientos

Cada tratamiento (cama y bolsa cerrada) era abastecida de solución por su propio tinaco de 1000 litros mientras que cama y bolsa abierta compartían un sólo tinaco de 1000 litros (Figura 4a). Para cada tratamiento se usó una bomba de ½ HP (marca Dica[®] modelo BPHP.50), un temporizador STEREN[®] modelo TEMP-08E, un filtro de anillos (marca Irritec[®] de 120 mesh o 130 micron), un medidor de flujo (Figura 4b), tubería de 1” y cinta de riego con gotero insertado con gasto de 1 litro por minuto. A cada planta le correspondió un gotero.

Todos los días en los sistemas abiertos y cerrados se midió el volumen de solución nutritiva aportada usando el medidor de flujo y la cantidad de solución nutritiva colectada en las cubetas con una probeta de 1,000 ml; también se determinó el pH y conductividad eléctrica (medidor portátil Hanna, modelo HI 98130); en el sistema DFT se midió la cantidad de agua aportada así como su pH y conductividad eléctrica. El drenaje de los sistemas abiertos se llevó fuera del invernadero mientras que el de los sistemas cerrados se colectó en tinacos de 400 litros (un tinaco por tratamiento; Figura 4c). A los 39, 46, 57, 63, 70, 78, 89, 97 y 106 ddt, cuando se acumuló cerca de 400 litros se tomó una muestra de cada tinaco junto con una muestra de cada repetición del sistema DFT.

Para analizar los nutrientes (N-NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y P) se usó un electrodo de ion selectivo (ISE) (Thermo Scientific®, modelo Orion 4 Star) para K^+ , Ca^{2+} y N-NO_3^- (Figura 5b), para P se usó la técnica colorimétrica para el desarrollo de color por el método de molibdobanadato (Chapman y Pratt, 1973).

Una vez conocida la composición de la solución nutritiva se filtró y después se desinfectó con una lámpara UV (capacidad de 25 watts, 6 GPM modelo Philips; Figura 4d) cuando se pasó al tinaco de 1000 L según fuera el tratamiento (bolsa cerrada o cama cerrada), una vez en el tinaco de 1000 L se equilibró hasta donde fuera posible los elementos a la concentración de inicio (Cuadro 4). En las tinas de DFT la solución nutritiva se ajustó de manera individual en cada repetición.

Cuando se ajustó la solución nutritiva de bolsas y camas cerradas, se consideró la concentración de cada elemento presente y el volumen de solución nutritiva recuperada. Si era necesario se agregó agua simple para lograr acercarse a la concentración de inicio

(Cuadro 4); en caso contrario se recurrió a las fuentes de fertilizante para reponer los elementos faltantes (Cuadro 5); esta última situación fue lo que siempre se manifestó en el sistema DFT. Una vez ajustada la solución se procedió a aforar a 1000 litros (capacidad de los tinacos) con solución nutritiva normal (Cuadro 5).

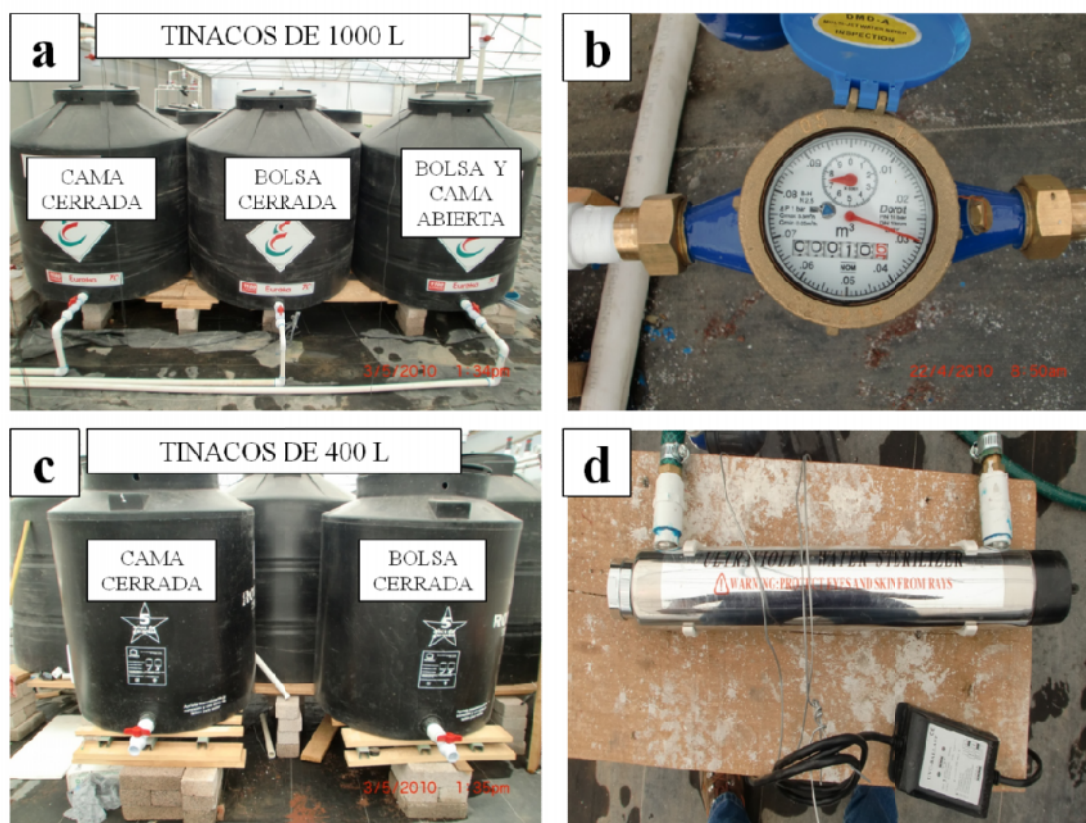


Figura 4. Depósito donde se preparó y ajustó la solución nutritiva (a). Medidor de agua volumétrico (b). Depósitos donde se acumuló los drenajes de los tratamientos cama y bolsa cerrada (c). Lámpara UV usada para desinfectar la solución nutritiva (d).

3.5 Unidad y diseño experimental

El tamaño de la unidad experimental fue 1.7 m^2 ($1.9 \times 0.9 \text{ m}$) donde 18 plantas estaban distribuidas en 3 hileras, separas a 30 cm entre plantas y entre hileras. Se uso el diseño experimental de bloques completos al azar con cinco repeticiones.

3.6 Índices y caracteres evaluados

3.6.1 Caracteres morfológicos

Estos caracteres se evaluaron a los 17, 26, 38, 48, 59, 75 y 90 días después del trasplante (ddt).

- Diámetro de tallo entre la 5ª y 6ª hoja verdadera (cm). Se usó un vernier digital. Se consideró el promedio de 5 plantas por unidad experimental.
- Altura de planta (cm). Se hizo con cinta metálica graduada. Se midió de la base del tallo hasta el ápice de crecimiento del tallo principal. Se consideró el promedio de 5 plantas por unidad experimental.
- Ancho de la parte aérea normal (ancho de copa) (cm). Con el apoyo de una cinta metálica graduada. De forma horizontal, sin perturbar las hojas se midió la parte más ancha de la parte aérea de la planta. Se consideró el promedio de 5 plantas por unidad experimental.
- Área foliar por planta. Con un integrador de área foliar, LICOR-300 Lincon, Nebraska (m²). A los 36 ddt se registró el largo y ancho de cada hoja y su área. 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 (25, 51 y 92 ddt) de modo que solo con medir el largo y ancho de cada hoja se estimó su área. Se consideró una planta por unidad experimental.

3.6.2 Índices de crecimiento

Se realizaron 5 muestreos destructivos a los 25, 36, 51 y 92 ddt. Para generar las gráficas de los indicadores de crecimiento (peso seco de planta, tallo, hojas, frutos, TAN, TCC e

IAF) y caracteres morfológicos se aplicó el programa de cómputo para la estimación de parámetros de modelos no lineales del modelo logístico (Rodríguez *et al*, 2006). Mediante el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS, 2002). Se determinaron los estimadores de los parámetros (A, B y C) y partir de esta información se construyeron las curvas.

$$y = \frac{A}{1 + Be^{-Cx}}$$

Donde:

y = Variable respuesta.

y' = Primera derivada de y.

A = Punto de asintoticidad; A/2 corresponde a la ordenada del punto de inflexión de la curva.

B = Parámetro relacionado con la ordenada al origen.

e = Base de logaritmo natural (2.718281828...).

C = Parámetro relacionado con el valor de x y la velocidad de crecimiento.

x = Días después del trasplante.

- Peso seco por planta, tallo, hojas y frutos. Se tomo una planta por unidad experimental y se seco en una estufa a 70 °C hasta peso constante.
- Tasa de asimilación neta (TAN, g·m⁻² de hoja·d⁻¹)

$$TAN = \frac{PS_2 - PS_1}{AF_2 - AF_1} \times \frac{\ln(AF_2) - \ln(AF_1)}{t_2 - t_1}$$

Donde:

PS = Pesos de la biomasa total de la planta al final y al inicio de un periodo determinado.

AF = Área Foliar promedio de la planta al final y al inicio del mismo periodo.

$t_2 - t_1$ = Tiempo transcurrido entre los dos muestreos.

$\ln$ = Logaritmo natural.

- Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ de suelo $\cdot \text{d}^{-1}$).

$$TCC = IAF \times TAN$$

- Índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Área foliar total de una planta entre el área de superficie que ocupó.
- Índice de cosecha (IC).

$$IC = \frac{\text{rendimiento agronómico por planta}}{\text{peso seco de la planta}}$$

- Razón de área foliar (RAF, $\text{dm}^{-2} \cdot \text{g}^{-1}$).

$$RAF = \frac{\text{área foliar}}{\text{peso seco de la planta}}$$

- Eficiencia metabólica del área foliar (EMAF, $\text{g} \cdot \text{dm}^{-2}$).

$$EMAF = \frac{\text{peso seco del fruto}}{\text{área foliar}}$$

3.6.3 Rendimiento y sus componentes

Se hicieron cinco cortes entre el 29 de julio (87 ddt) y 25 de agosto de 2010 (114 ddt).

Los frutos se cortaron en grado de madurez 4 (entre el 30 y 60 % de la superficie del fruto muestra color rosa o rojo), se pesaron y se clasificaron con los criterios de la norma

PC-020-2005 perteneciente a la marca México calidad suprema la cual clasifica a los frutos tipo saladette de la siguiente manera:

- Frutos chicos (de 38 a 52 mm)
- Frutos medianos (de 51 a 60 mm)
- Frutos grandes (de 59 a 71 mm)
- Frutos extra grandes (de 70 a 76 mm)
- Frutos no comercializables

Se determinó el peso promedio del fruto, el rendimiento de fruto en $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $\text{Kg}\cdot\text{planta}^{-1}$, número de frutos $\cdot\text{m}^{-2}$ y peso de fruto $\cdot\text{racimo}^{-1}$.

3.6.4 Agua y nutrientes

El gasto y consumo de agua en litros se calculó usando los datos de gasto de agua registrados con el medidor de flujo y el volumen de drenaje colectado en cada sistema. En el sistema DFT se usó el volumen de agua que se restablecía.

El gasto y consumo de nutrientes en gramos se estimó con los análisis químicos realizados a los drenajes los días 39, 46, 57, 63, 70, 78, 89, 97 y 106 ddt. Los nutrientes fueron K^+ , Ca^{2+} , N-NO_3^- y P para cada sistema.

3.7 Análisis estadístico

Los análisis de varianza y las comparaciones de medias de los caracteres morfológicos, indicadores de crecimiento y variables de rendimiento y sus componentes, 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). Debido a la forma en que se colectaron las muestras de la solución nutritiva reciclada y del sistema DFT, no se hicieron pruebas estadísticas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracteres morfológicos

El cuadro de análisis de varianza (Cuadro 1A), y el cuadro de comparación de medias (Cuadro 6) muestra que en cuatro de las siete fechas consideradas, hubo diferencias significativas entre tratamientos para el diámetro de tallo a favor del sistema DFT. Para los demás caracteres, no se observó una tendencia diferente en los sistemas cerrados o en el sistema DFT respecto a los sistemas abiertos. Se esperaría que el incremento de la conductividad eléctrica en bolsa y cama cerrada (Figura 15) afectara el crecimiento (Tunali *et al.*, 2009; Savvas *et al.*, 2009); sin embargo, no fue así. La dinámica de crecimiento en las variables área foliar, diámetro de tallo, altura de planta y ancho de planta, no mostraron gran diferencia entre tratamientos (Figura 5); como ya se mencionó, el tratamiento DFT resultó estadísticamente superior en diámetro de tallo en cuatro de los siete muestreos y a los 25 ddt en área foliar (Cuadro 6). Probablemente los primeros días, las raíces de las plantas se adaptaron con mayor facilidad en el sistema DFT; la temperatura en el sistema radical pudo haber influido durante los primeros días. Las bolsas y sobre todo las camas presentaron temperaturas más elevadas que por momentos sobrepasaron los 30 °C mientras que en DFT se mantuvieron entre 21 a 24 °C los primeros 25 ddt. Chong e Ito (1982), al estudiar diferentes temperaturas de la solución nutritiva en un sistema nutrient film technique (NFT) reportan que el crecimiento radical y parte aérea en plantas de tomate fue favorecido con la temperatura de 25 °C, lo mismo reporta Ikeda y Osawa (1988).

Cuadro 6. Comparaciones de medias de diámetro de tallo, altura de planta, ancho de copa, y área foliar por planta, durante el ciclo de cultivo de tomate en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Días después del trasplante						
	17	26	38	48	59	75	90
-----Diámetro de tallo (cm)-----							
Cama abierta	0.76 b ^z	1.04 b	1.2 a	1.25 a	1.3 ab	1.2 b	1.2 a
Bolsa abierta	0.75 b	1.08 ab	1.2 a	1.31 a	1.3 ab	1.2 ab	1.3 a
Cama cerrada	0.76 b	1.05 b	1.24 a	1.26 a	1.3 ab	1.2 ab	1.3 a
Bolsa cerrada	0.75 b	1.07 ab	1.31 a	1.27 a	1.2 b	1.2 ab	1.2 a
DFT	0.85 a	1.17 a	1.31 a	1.34 a	1.5 a	1.4 a	1.4 a
DMS	0.05	0.1	0.21	0.19	0.21	0.16	0.2
-----Altura de planta (cm)-----							
Cama abierta	31.3 a	64 ab	86 a	85.8 a	89 a	89 a	89 a
Bolsa abierta	31.5 a	63.4 ab	84.2 a	88.4 a	88 a	88 a	88 a
Cama cerrada	31.3 a	63.3 ab	84.7 a	88.9 a	89 a	89 a	89 a
Bolsa cerrada	31.5 a	62.7 b	87.8 a	91.9 a	92 a	92 a	92 a
DFT	31.6 a	65.2 a	87.4 a	92.4 a	92 a	92 a	92 a
DMS	1.4	2.4	7.3	8.1	9.1	9.1	9.1
-----Ancho de copa (cm)-----							
Cama abierta	52.3 a	70.5 ab	69.5 a	69.7 a	66.8 a	66.6 a	60.7 a
Bolsa abierta	50.4 a	74.8 a	70.7 a	70.4 a	67.8 a	66.8 a	61.4 a
Cama cerrada	49.8 a	73.6 ab	68.4 a	69.7 a	69.0 a	69.5 a	61.3 a
Bolsa cerrada	50.6 a	73.0 ab	71.0 a	71.7 a	69.9 a	66.8 a	64.0 a
DFT	54.0 a	66.6 b	68.7 a	67.4 a	65.8 a	67.2 a	61.2 a
DMS	6.2	7.2	6.5	5.3	5.4	5.7	4.0
-----Área foliar por planta (m ² ·p ⁻¹)-----							
	25	36	51	92	-	-	-
Cama abierta	0.331 b	0.781 a	1.019 a	1.003 a	- -	- -	- -
Bolsa abierta	0.285 b	0.633 a	0.987 a	1.005 a	- -	- -	- -
Cama cerrada	0.319 b	0.788 a	1.030 a	1.045 a	- -	- -	- -
Bolsa cerrada	0.320 b	0.762 a	1.031 a	1.039 a	- -	- -	- -
DFT	0.441 a	0.901 a	1.054 a	1.073 a	- -	- -	- -
DMS	0.070	0.272	0.205	0.216	- -	- -	- -

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

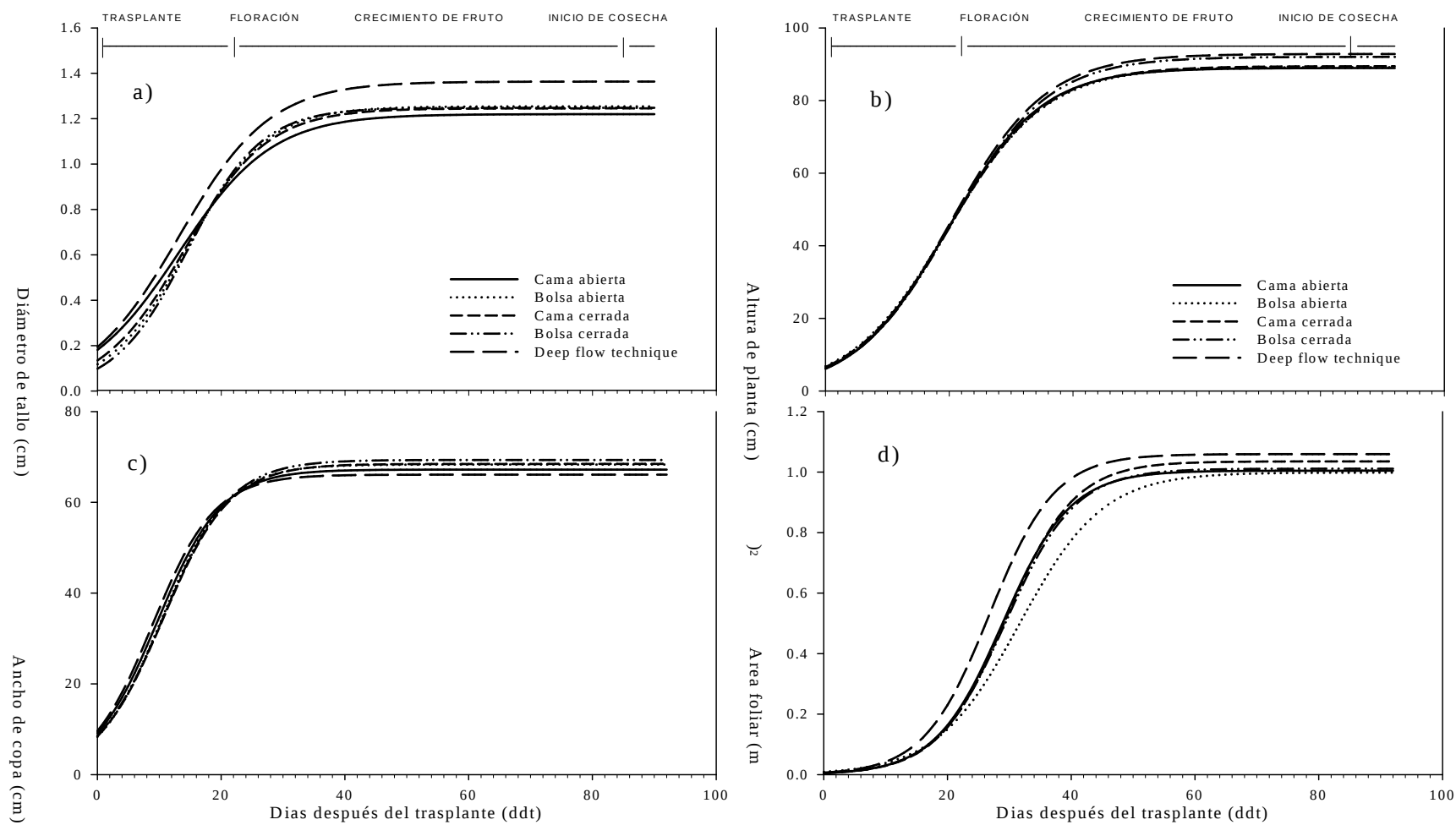


Figura 5. Desarrollo de diámetro de tallo (a), altura (b), ancho de copa (c) y área foliar (d) de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

4.2 Índices de crecimiento

Estadísticamente, en los primeros 25 días (desarrollo vegetativo) el tratamiento DFT tuvo la mayor ganancia de materia seca en tallos y hojas. Entre sistemas abiertos y cerrados en bolsas y camas no se observaron diferencias estadísticas en la acumulación de materia seca en los distintos órganos en ningún muestreo (Cuadro 7).

Es importante destacar que al recircular la solución nutritiva no se causó afectó sobre el peso seco de las plantas de tomate, esto difiere a lo reportado por Zekki *et al.* (1996) quienes señalan en un sistema NFT, la materia seca de la parte aérea se redujo por el incremento en la concentración de SO_4^{2-} (que conduce a un incremento en la CE y a desajustes de la solución nutritiva) generando tallos delgados y hojas pequeñas. Sin embargo, otros trabajos más recientes concuerdan que los sistemas cerrados no afectan estos parámetros (biomasa de la parte aérea) cuando se reduce el uso de fertilizantes con SO_4^{2-} (Dasgan y Erci, 2005); se maneja una CE de 0.7 a 2.1 (Nakano *et al.*, 2010) o el agua que se usa es de buena calidad (Hao y Papadopoulos, 2002).

Cuadro 7 . Comparaciones de medias de materia seca total, hojas, tallo, fruto, índice de área foliar (IAF) y razón de área foliar (RAF) durante el ciclo de cultivo de tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.

Muestreo ddt	Tratamiento	Materia seca (g)				IAF		RAF	
		Total	Hojas	Tallo	Fruto	(m ² ·m ⁻²)		(dm ² ·g ⁻¹)	
25	Cama abierta	15.6 b ^z	13.0 b	2.6 b	- -	2.0 b		2.13 a	
	Bolsa abierta	14.0 b	11.4 b	2.6 b	- -	1.7 b		2.04 a	
	Cama cerrada	16.6 b	13.6 b	2.9 b	- -	1.9 b		1.93 a	
	Bolsa cerrada	15.0 b	12.4 b	2.7 b	- -	1.9 b		2.14 a	
	DFT	22.0 a	18.0 a	4.0 a	- -	2.6 a		2.01 a	
	DMS	3.4	2.9	0.7	- -	0.4		0.28	
36	Cama abierta	49.5 ab	36.5 ab	9.8 ab	3.2 a	4.7 ab		1.59 a	
	Bolsa abierta	42.5 b	30.0 b	9.1 b	3.4 a	3.8 b		1.46 a	
	Cama cerrada	49.3 ab	36.3 ab	9.7 ab	3.3 a	4.7 ab		1.61 a	
	Bolsa cerrada	49.0 ab	36.4 ab	9.9 ab	2.7 a	4.6 ab		1.55 a	
	DFT	60.4 a	45.4 a	12.3 a	2.8 a	5.4 a		1.48 a	
	DMS	14.9	12.8	2.6	2.3	1.4		0.28	
51	Cama abierta	98.7 a	57.9 a	14.3 a	26.5 a	5.7 a		1.04 a	
	Bolsa abierta	103.8 a	64.0 a	16.3 a	23.5 a	5.6 a		0.96 a	
	Cama cerrada	94.8 a	57.0 a	14.6 a	23.3 a	5.7 a		1.12 a	
	Bolsa cerrada	92.8 a	55.5 a	13.7 a	23.5 a	5.8 a		1.13 a	
	DFT	112.7 a	70.4 a	18.8 a	23.5 a	5.9 a		0.94 a	
	DMS	34.4	25.7	5.4	9.5	1.2		0.33	
92	Cama abierta	248.8 a	91.0 a	21.9 a	135.9 a	5.9 a		0.41 a	
	Bolsa abierta	223.6 a	75.6 a	20.2 a	127.8 a	5.7 a		0.46 a	
	Cama cerrada	243.3 a	86.2 a	21.8 a	135.3 a	5.8 a		0.44 a	
	Bolsa cerrada	224.6 a	81.7 a	25.9 a	117.0 a	5.8 a		0.46 a	
	DFT	244.7 a	90.6 a	28.8 a	125.2 a	6.0 a		0.46 a	
	DMS	75.6	26.6	14.0	45.6	1.3		0.16	

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

Como era de esperar, la distribución de materia seca cambió durante el desarrollo del cultivo (Figura 6). En promedio a los 25 ddt hojas y tallos presentaron 82.2 y 17.8 % de materia seca, respectivamente. A los 36 ddt nuevamente hojas y tallos acumularon la mayor cantidad de materia seca con 73.5 y 20.3 % mientras que los frutos representaron 6.3 %. De los 36 a los 51 ddt el efecto de los frutos en la competencia por fotoasimilados significó un incremento de 74.2 % respecto al muestreo anterior y a los 92 ddt el fruto figuró como el órgano con mayor peso seco con 54.1 %. El promedio entre sistemas en la distribución relativa de materia seca se muestra en la Figura 6.

Al remover el meristemo apical, las relaciones fuente-demanda se modifican, se reduce la competencia por los fotoasimilados y se favorece el amarre, mayor peso y tamaño de

los frutos; sin embargo, si las densidades o, mejor dicho, si el índice de área foliar (IAF) son muy altos el beneficio se puede perder (Ucán *et al.*, 2005). En el presente trabajo el despunte se realizó a los 36 ddt, a partir de ese momento se favoreció el desarrollo de los tres primeros racimos, generando los mayores incrementos de materia seca como se muestra en la Figura 6.

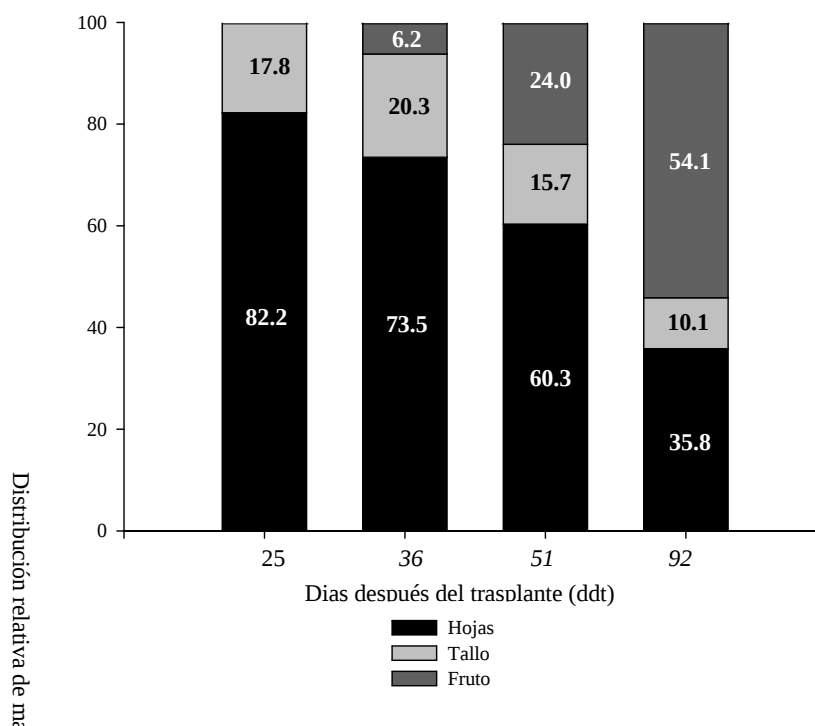


Figura 6. Promedio de distribución relativa de materia seca de hoja, tallo y fruto en diferentes fechas de muestreo en plantas de tomate cultivadas en hidroponía.

Con respecto al IAF, el análisis de varianza señala diferencias altamente significativas a los 25 ddt (Cuadro 4A). En este muestreo el tratamiento DFT fue 28 % superior a los otros sistemas; se puede deber a un menor estrés y más pronta recuperación en el trasplante en el sistema DFT (menor daño a la raíz); en el segundo muestreo 36 ddt el máximo IAF ($5.4 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) fue en DFT y el menor ($3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) en bolsa abierta, existe una diferencia de 30 % (Cuadro 8). En el tercer muestreo en promedio los tratamientos presentaron un IAF de $5.7 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (Figura 3), valor superior a lo recomendado. En

tomate se sugiere mantener el IAF en $3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ (Heuvelink y Dorais, 2005), pues es cuando se intercepta de 90 a 92 % de la radiación, mantener un IAF superior reduce la TAN (Matsuda *et al.*, 2011) y no presenta efecto positivo en el rendimiento (Heuvelink y Dorais, 2005), incluso puede llegar a reducir el peso promedio de los frutos (Ucán *et al.*, 2005).

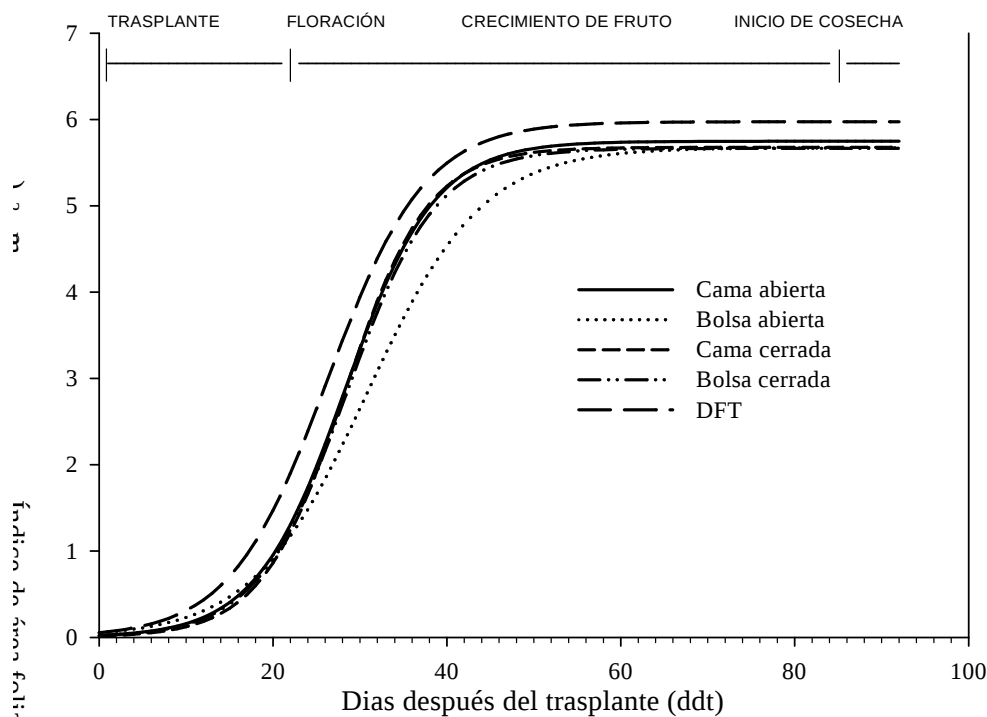


Figura 7. Índice de área foliar en tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.

La razón de área foliar resultó estadísticamente igual en los 4 muestreos realizados. En el Cuadro 8 se muestra que al principio este valor fue mayor y va disminuyendo al ir movilizandolos fotoasimilados producidos a los diferentes órganos o estructuras diferentes de las hojas.

Con los datos obtenidos en el último muestreo destructivo (92 ddt) se calculó la eficiencia metabólica del área foliar, la cual no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 8).

A medida que los frutos incrementan la demanda de fotoasimilados, un porcentaje cada vez mayor de los mismos se dirigen hacia los mismos. A partir de la floración, la removilización y acumulación de fotoasimilados comienza a dirigirse a los frutos, representando la mayor biomasa producida. La eficiencia de la repartición de biomasa (fotoasimilados) para obtener el mayor rendimiento comercial se puede representar como índice de cosecha (IC). En este estudio este IC no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos (Cuadro 8). Sin embargo, es necesario mencionar que se calculó con el muestreo destructivo realizado a los 92 ddt (última cosecha a los 114 ddt), por lo tanto faltaban frutos que llegaran a su máximo estado de madurez fisiológica y por lo tanto obtener el mayor peso fresco y seco. Los IC encontrados van de 0.51 a 0.57 %, estos están por debajo de lo reportado por Ho (1984) y Sánchez *et al.* (2010), quienes reportan 0.65 y 0.67 %, respectivamente. Mientras Scholberg *et al.* (2000) señalan un IC de 0.53 a 0.71 % en un cultivo de tomate semi determinado cultivado en campo abierto. Papadopoulos y Pararajasingham (1997) señalan IC en el orden de 65 a 72 % para tomate.

Cuadro 8. Comparaciones de medias para eficiencia metabólica del área foliar (EMAF) e índice de cosecha (IC) en plantas tomate a los 92 ddt en diferentes sistemas hidropónicos.

Muestreo ddt	Tratamiento	EMAF (g·dm ⁻²)	IC (%)
92	Cama abierta	1.42 a ^z	0.54 a
	Bolsa abierta	1.36 a	0.57 a
	Cama cerrada	1.39 a	0.55 a
	Bolsa cerrada	1.22 a	0.52 a
	DFT	1.26 a	0.51 a
	DMS	0.54	0.07

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

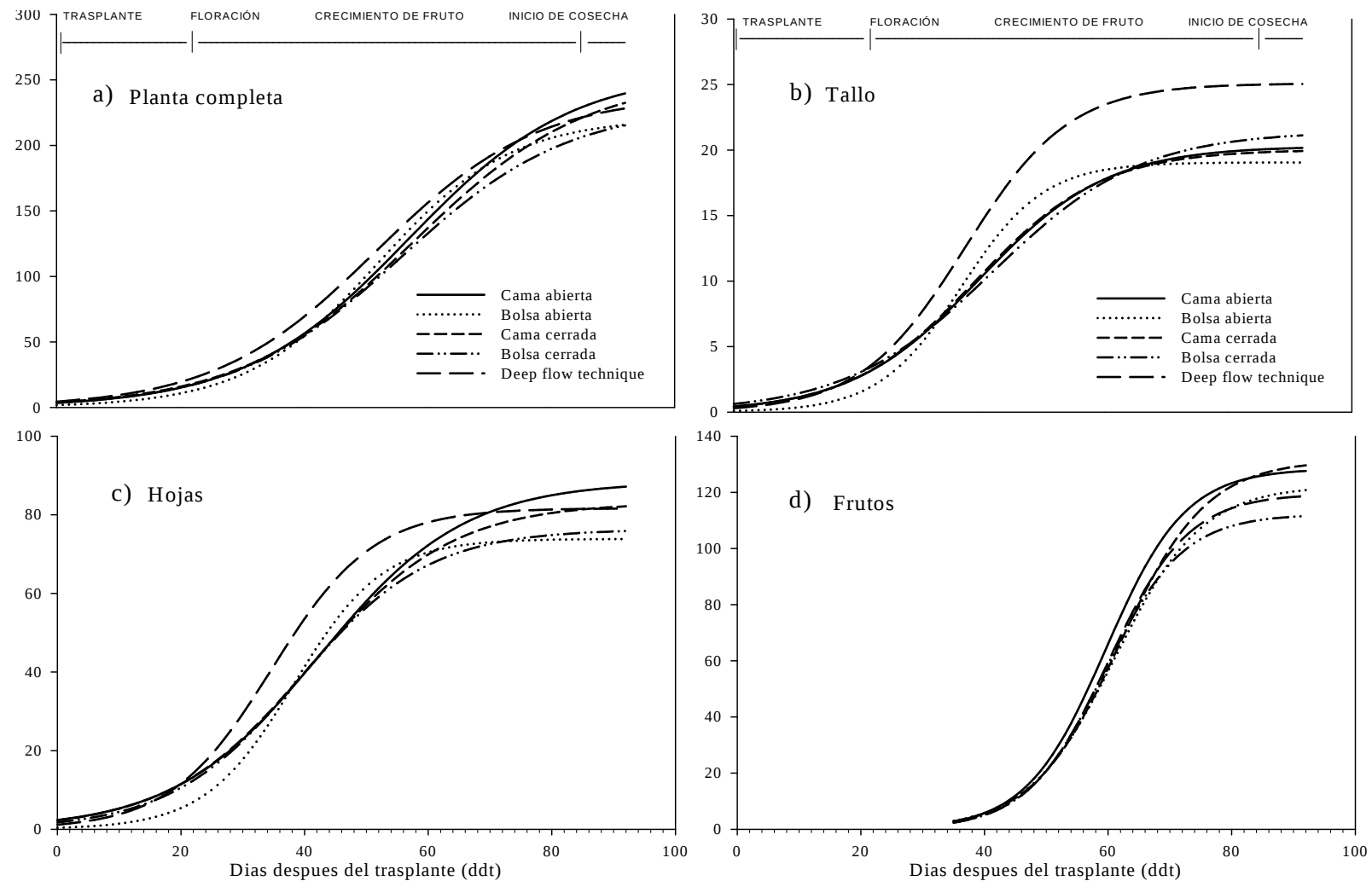


Figura 8. Desarrollo de materia seca en toda la planta (a), tallo (b), hojas (c) y frutos (d), en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

4.2.1 Tasa de asimilación neta (TAN)

Los valores de TAN en las plantas no mostraron diferencia significativa entre tratamientos en ninguno de los periodos (Cuadro 9); Por lo tanto la eficiencia de un metro cuadrado de hojas para producir fotoasimilados fue similar entre tratamientos. Los valores máximos se registraron los primeros días del desarrollo y disminuyeron al aumentar el área foliar y la edad de la planta. La TAN de los tratamientos en el primer periodo de muestreo (25 a 36 ddt) al segundo (36 a 51ddt) en promedio se redujo 36 % al pasar de $2.53 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de hoja·día⁻¹ a $1.62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de hoja·día⁻¹. Al respecto Matsuda *et al.* (2011) mencionan que cuando el IAF se incrementa de 1 a $3 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$, la luz interceptada por el dosel se incrementa de 56 a 92 %. En el presente trabajo un IAF de $3 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ se estableció entre los 26 y 31 ddt (Figura 3), momento en que la TAN comienza a mantenerse constante (Figura 5). A partir de un IAF $3 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ el incrementar el área foliar, provoca sombreo entre las hojas y junto con la senescencia de ellas reducen la actividad fotosintética de la planta (Chi *et al.*,1991). Matsuda *et al.* (2011) interpretan en su trabajo una relación inversa entre TAN e IAF, es decir la luz interceptada por el dosel y el IAF se expresan como función exponencial negativa; señalan también que a partir de un IAF de $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ el dosel reduce en gran medida su capacidad para interceptar mayor cantidad de luz.

Chi *et al.* (1991), reportan que cuando el IAF paso de 3.82 a $6.45 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ la TAN se redujo de 1.71 a $1.22 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ de hoja·día⁻¹.

Cuadro 9. Comparaciones de medias para tasa de asimilación neta (TAN) en distintos periodos de muestreo en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	TAN ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ de hoja·día ⁻¹)		
	Periodo		
	25-36 (ddt)	36-51 (ddt)	51-92 (ddt)
Cama abierta	2.56 a ^z	1.62 a	1.60 a
Bolsa abierta	2.56 a	2.21 a	1.49 a
Cama cerrada	2.49 a	1.47 a	1.50 a
Bolsa cerrada	2.64 a	1.43 a	1.36 a
DFT	2.40 a	1.39 a	1.55 a
DMS	0.64	0.86	0.81

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DFT=Deep flow technique DMS=Diferencia mínima significativa. ddt= días después del trasplante.

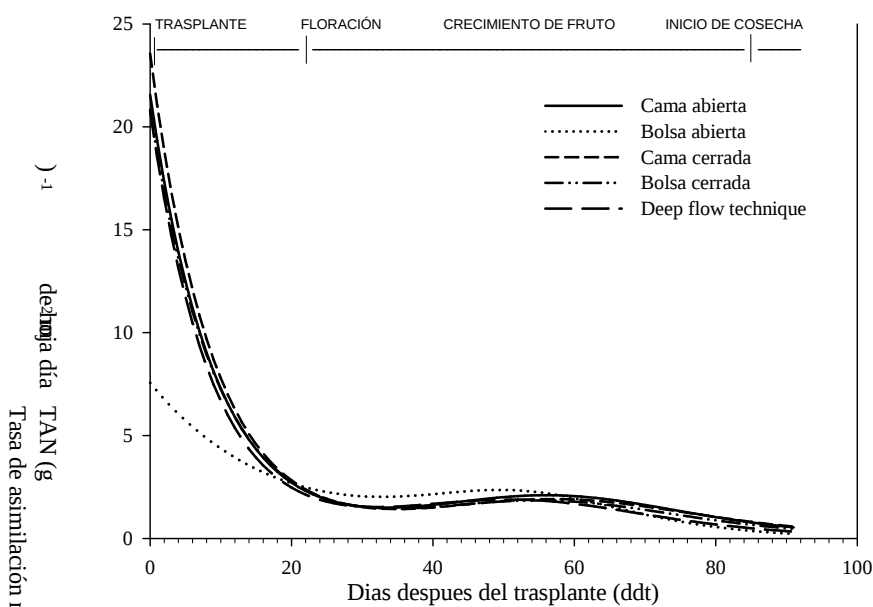


Figura 9. Desarrollo de la tasa absoluta de asimilación neta (TAN) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

4.2.2 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)

Es importante destacar que como resultado de un IAF mayor en los primeros días (Figura 7), la TCC en el sistema DFT fue estadísticamente superior (Cuadro 10, Figura 10), ello probablemente porque las hojas fueron más eficientes e interceptaron mayor radiación. Después en los siguientes periodos no hubo diferencia estadística entre

sistemas. Sin embargo cuando los tratamientos presentaron la mayor TCC, se observa que el tratamiento bolsa abierta presentó el valor más alto ($12.7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$); probablemente el menor IAF que tenía respecto a los demás tratamientos antes de este pico, evitó el excesivo sombreo de hojas, por lo que éstas fueron más activas para producir fotoasimilados.

Después de los máximos valores la TCC comienza a disminuir ya que no existe más crecimiento por el despunte realizado y comienza la senescencia foliar. Matsuda *et al.* (2011) reporta valores aproximados a $21 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$.

Cuadro 10. Comparaciones de medias para tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en distintos periodos de muestreo en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	TCC ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$)		
	Periodo 25-36 (ddt)	Periodo 36-51 (ddt)	Periodo 51-92 (ddt)
Cama abierta	5.03 ab ^z	7.54 a	8.85 a
Bolsa abierta	4.38 b	8.01 a	8.23 a
Cama cerrada	4.75 b	6.85 a	8.62 a
Bolsa cerrada	5.06 ab	6.59 a	7.82 a
DFT	6.32 a	7.22 a	9.15 a
DMS	1.38	5.02	4.20

^z Valores con diferente letra dentro de la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$. DFT=Deep flow technique DMS=Diferencia mínima significativa. ddt= días después del trasplante.

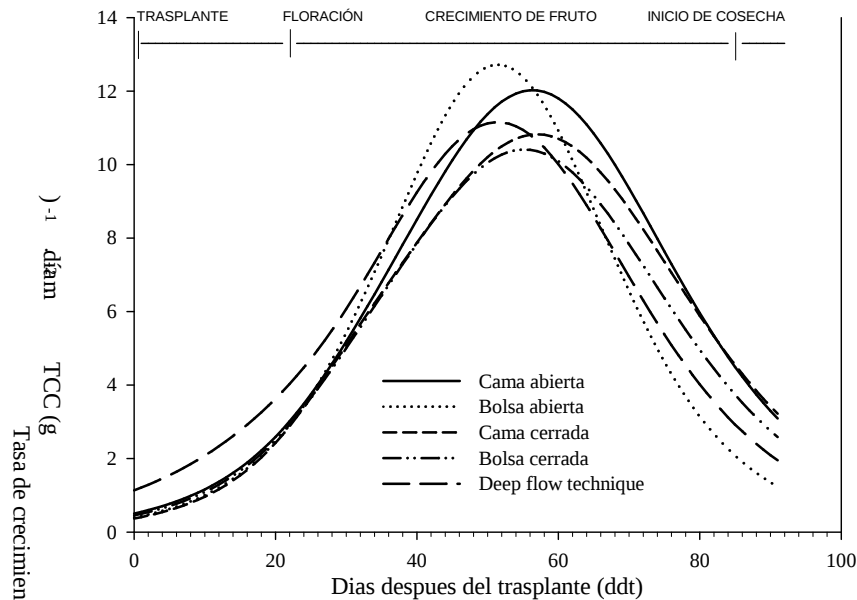


Figura 10. Desarrollo de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

4.3 Rendimiento y sus componentes

El rendimiento es determinado por el peso y número de los frutos; expresando el rendimiento con estos componentes, DFT y bolsas cerrada tuvieron los valores más altos, 16.7 y $15.3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2}$, así como 142.1 y $140.4 \text{ frutos} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente (Cuadro 11); sin embargo, no existió diferencia significativa entre bolsas y camas en los sistemas abiertos y cerrados, lo cual coincide con Oztekin *et al.* (2008) y Nakano *et al.* (2010) pero difiere de Pardossi *et al.* (2009), quienes reportan que un elevado nivel de salinidad en el sistema cerrado redujo el rendimiento; en el presente trabajo niveles elevados de salinidad se presentaron pero en la etapa de cosecha en bolsa y cama cerrada, cuando ya no existía crecimiento vegetativo ni formación de flores. Después de la fructificación del tercer racimo la mayoría de los frutos estaban madurando o finalizando su máximo crecimiento lo cual redujo la posibilidad de afectar la producción.

Cuadro 11. Comparación de medias de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$, frutos $\cdot\text{m}^{-2}$, peso promedio de fruto y rezaga en tomate cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$	Frutos $\cdot\text{m}^{-2}$	Peso promedio de fruto (g)	Rezaga ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
Cama abierta	13.0 c ^z	115.9 b	112.4 a	1.43 ab
Bolsa abierta	14.4 bc	127.3 ab	113.2 a	1.96 a
Cama cerrada	13.9 bc	122.4 b	113.2 a	0.82 b
Bolsa cerrada	15.3 ab	140.1 ab	109.0 a	1.51 ab
DFT	16.7 a	142.1 a	117.6 a	0.67 b
DMS	2.1	15.8	11.1	1.00

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

Ucán *et al.* (2005), comparando densidades de plantación en un cultivo de tomate bola, señalan que al aumentar la densidad de 6 a 12 plantas $\cdot\text{m}^{-2}$ se incrementa el rendimiento (12.5 a 19.9 $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$), pero se reduce el peso medio de fruto (158.5 a 124.9 g $\cdot\text{fruto}^{-1}$); haciendo comparaciones en la misma densidad (6 plantas $\cdot\text{m}^{-2}$ de invernadero) el rendimiento de los tratamientos en el presente trabajo en promedio fue 14.4 % superior, pero el peso medio de fruto fue 28.7 % menor. Al expresar la producción de fruta en kilogramos por planta Sánchez *et al.* (2010), trabajando con tomate bola con altas densidades y despunte a tres racimos, reporta 2.11 $\text{Kg}\cdot\text{planta}^{-1}$; en el presente experimento todos los tratamientos presentaron un rendimiento por planta ligeramente superior.

En el peso promedio de fruto no hubo diferencia entre tratamientos indicando un tamaño y calidad similar entre sistemas cerrados y abiertos (Cuadro 12).

Al analizar el rendimiento por racimos, entre el primer y segundo racimo no existió diferencia significativa entre tratamientos, pero en el tercero DFT presentó un rendimiento por unidad de superficie (6.71 $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$) superior a los demás tratamientos, excepto al de bolsa en sistema cerrado. Cama cerrada y bolsa cerrada rindieron 4.61 y

6.04 Kg·m⁻², mientras que cama abierta y bolsa abierta presentaron 17.6 y 9.8 % menos que cama cerrada y bolsa cerrada, respectivamente (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación de medias de Kg·m⁻² en los diferentes racimos en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamientos	Racimo 1	Racimo 2	Racimo 3
	Rendimiento por racimo (Kg·m ⁻²)		
Cama abierta	4.60 a ^z	4.60 a	3.80 c
Bolsa abierta	4.22 a	4.77 a	5.45 ab
Cama cerrada	4.57 a	4.69 a	4.61 bc
Bolsa cerrada	4.06 a	5.16 a	6.04 a
DFT	4.45 a	5.52 a	6.71 a
DMS	0.7	1.1	1.3

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

4.4 Agua y nutrientes

El ahorro de agua y nutrientes sin disminución del rendimiento y sin incrementar los costos de producción a demás de reducir las descargas de fertilizantes al medio ambiente, es deseable.

En el presente trabajo reciclar la solución nutritiva significó ahorros importantes de agua y nutrimentos sin afectar el rendimiento; el gasto de nutrientes en cama cerrada respecto a cama abierta se redujo 27, 38, 46 y 30 %, mientras que en bolsa cerrada respecto a bolsa abierta fue de 48, 48, 52 y 40 % para K, Ca, N-NO₃⁻ y P, respectivamente (Cuadro 13). Otros trabajos reportan ahorros importantes en fertilizantes, aunque en varios de ellos hay reducción en el rendimiento (Parra *et al.*, 2009; Giuffrida *et al.*, 2003; Dasgan y Ekici, 2005) y en otros sin afectarlo (Giuffrida y Leonard, 2009; Nakano *et al.*, 2010; Pellicer *et al.*, 2007; Oztekin *et al.*, 2008).

En el sistema DFT además de que fue el tratamiento más difícil de manejar, no se ahorró tanto fertilizante porque al final del ciclo la solución nutritiva queda ya muy

desequilibrada y con una elevada CE para comenzar un nuevo ciclo; del total aplicado, el cultivo utilizó el 74, 80, 62 y 54 % de K, Ca, N-NO₃⁻ y P respectivamente, el resto se desechó (Cuadro 13).

Cuadro 13. Uso de nutrimentos (K, Ca, N-NO₃⁻ y P) en plantas de tomate, cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

Nutriente	Tratamiento	Nutrimento aplicado	Desechado		Consumo aparente del cultivo ^x	Ahorro ^y	Rendimiento
		(g·m ⁻²)	(g·m ⁻²)	(%)	(g·m ⁻²)	(%)	(Kg·m ⁻²)
K	Cama abierta	185.5	81.0*	43.6	-	-	13.0
	Bolsa abierta	196.5	77.7*	39.5	-	-	14.4
	Cama cerrada	135.0	6.1 ^z	4.5	128.88	27.2	13.9
	Bolsa cerrada	101.8	9.5 ^z	9.3	92.34	48.2	15.3
	DFT	139.1	36.2 ^z	26	102.97	-	16.7
Ca	Cama abierta	151.7	66.2	43.6	-	-	13.0
	Bolsa abierta	160.6	63.5	39.5	-	-	14.4
	Cama cerrada	93.3	1.7	1.8	91.62	38.5	13.9
	Bolsa cerrada	82.6	3.8	4.6	78.77	48.6	15.3
	DFT	103.6	19.9	19.2	83.77	-	16.7
N-NO ₃ ⁻	Cama abierta	110.4	48.2	43.6	-	-	13.0
	Bolsa abierta	116.9	46.2	39.5	-	-	14.4
	Cama cerrada	59.3	7.2	12.1	52.16	46.2	13.9
	Bolsa cerrada	55.6	9.5	17.1	46.09	52.4	15.3
	DFT	87.9	33.3	37.9	54.6	-	16.7
P	Cama abierta	44.5	19.4	43.6	-	-	13.0
	Bolsa abierta	47.2	18.6	39.5	-	-	14.4
	Cama cerrada	31.0	1.2	3.7	29.8	30.4	13.9
	Bolsa cerrada	28.1	1.8	6.4	26.31	40.4	15.3
	DFT	23.1	10.5	45.5	12.62	-	16.7

* valor estimado con el porcentaje de drenaje. ^z valor estimado con los análisis al momento de ajustar la solución nutritiva. ^xconsumo aparente = aplicado – drenado (considerando que una parte queda retenida en el sustrato y/o presipita); ^yahorro con respecto al sistema abierto.

Por problemas de uniformidad de riego y posición de las repeticiones, los gastos de agua entre bloques fueron diferentes. El porcentaje promedio de drenaje que se manifestó en los sistemas durante todo el ciclo fue de 43.7 % en camas y 39.5 % en bolsas, valores superiores a los considerados a nivel comercial (20 a 30 %) con la calidad de agua que se preparaba la solución nutritiva. Estimando el ahorro con un drenaje de 20 a 30 % los ahorros serían menores (Cuadro 14).

Cuadro 14. Ahorro estimado de nutrimentos con base en distintos porcentajes de drenaje en dos sistemas hidropónicos cerrados.

Tratamiento	Nutriente							
	K		Ca		N-NO ₃ ⁻		P	
	20 %	30 %	20 %	30 %	20 %	30 %	20 %	30 %
Cama cerrada	12.4	18.6	17.5	26.2	21.0	31.5	13.8	20.8
Bolsa cerrada	21.9	32.8	22.1	33.1	23.8	35.8	18.4	27.6

El consumo aparente de forma acumulado, de elementos nutritivos (K, Ca, N-NO₃⁻ y P) estimada con los análisis químicos de la solución nutritiva recirculada y considerando que una parte quedo retenida en el sustrato en los tratamientos bolsa cerrada, cama cerrada se muestra en la Figura11.

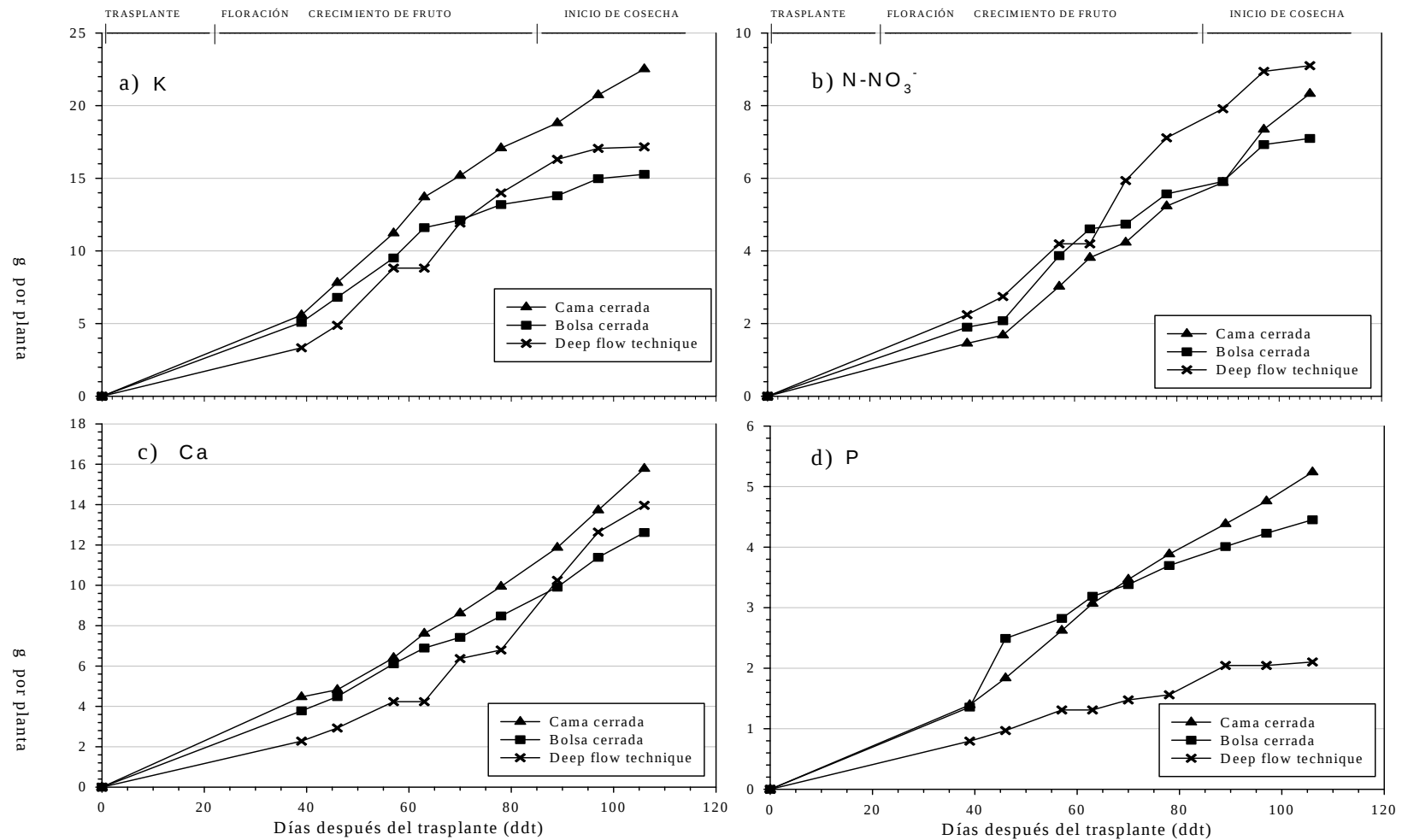


Figura 11. Consumo aparente de K (a), $N-NO_3^-$ (b), Ca (c) y P (d) en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos cerrados.

El consumo neto de K, Ca, N-NO₃⁻ y P en el presente trabajo, es similar a los reportados por Alarcón *et al.* (2001) en un cultivo de tomate de 120 días bajo un sistema hidropónico cerrado usando como sustrato perlita (Cuadro 15). El rendimiento que obtuvieron con ese consumo neto de nutrientes fue de 12.1 Kg·m⁻² mientras que en la presente investigación el rendimiento promedio en los sistemas cerrados fue de 15.3 Kg·m⁻².

En otro estudio realizado en toba volcánica como sustrato Tüzel *et al.* (2001) (Cuadro 15) reportan un rendimiento de 17.28 Kg·m⁻² y un consumo de 21.18 , 13.87, 12.92 y 4.62 g·planta⁻¹ de K⁺, Ca²⁺, N-NO₃⁻ y P-H₂PO₄⁻, respectivamente. Para efecto de comparaciones los consumos en bolsa cerrada y cama cerrada en el presente trabajo coinciden en los nutrimentos K⁺, Ca²⁺ y P-H₂PO₄⁻, aunque difieren en el consumo de N-NO₃⁻. Cabe señalar que aunque Tüzel *et al.* (2001) reportan rendimientos más altos que en el presente trabajo, también sus ciclos de cultivo son más largos.

Cuadro 15. Consumo estimado de nutrientes con base a los análisis químicos de la solución nutritiva recirculante y consumo reportado por diferentes autores en un cultivo de tomate

Tratamiento		Consumo de Nutrientes (g·planta ⁻¹)				Rendimiento (Kg·m ⁻²)
		K ⁺	Ca ²⁺	N-NO ₃ ⁻	P	
Tratamiento	Cama cerrada	21.48	15.27	8.69	4.97	13.9
	Bolsa cerrada	15.39	13.13	7.68	4.38	15.3
	DFT	17.16	13.96	9.10	2.10	16.7
Autor	Alarcon <i>et al.</i> (2001)	23.73	13.00	13.77	3.93	12.1
	Tüzel <i>et al.</i> (2001)* (Ciclo de primavera)	21.18	13.87	12.92	4.62	17.28
	Tüzel <i>et al.</i> (2001)* (Ciclo de otoño)	12.59	8.09	7.88	4.18	16.03

Es importante resaltar que en los sistemas hidropónicos un porcentaje de los nutrientes son retenidos en el sustrato (Pineda *et al.*, 2011) y/o pueden disociarse y/o precipitarse

en función del pH (De Rijck y Schrevens, 1997a; De Rijck y Schrevens, 1998a; De Rijck y Schrevens, 1998b) o por efecto de su concentración en la solución nutritiva (De Rijck y Schrevens, 1998c; De Rijck y Schrevens, 1998d; De Rijck y Schrevens, 1997b). Pineda *et al.* (2011) usando como sustrato arena de tezontle reportan que del total de nutrientes aplicados a un cultivo de tomate en condiciones de hidroponía con drenaje libre durante 74 días, 35.1 % de K, 38.8 % de Ca, 1.9 % de N, 54.8 % de P y 26.5 % de Mg % fueron retenidos en el sustrato. Los mismos autores señalan que durante los primeros 40 días, el sustrato almacenó una gran cantidad de nutrientes y que durante la fase de floración y el inicio de cuajado de fruto fue cuando comenzaron a ser absorbidos los nutrimentos retenidos en el sustrato. En la presente investigación el ciclo de cultivo duró 114 días, también se uso el mismo sustrato que Pineda *et al.* (2011); al despuntar la planta a los 36 ddt el crecimiento vegetativo y reproductivo se detuvo, por lo que gran parte de los nutrientes comenzaron a acumularse en el sustrato; se considera por lo tanto que una parte de los nutrientes quedaron retenidos en el sustrato lo que origino un incremento en la CE (Figura 15). Por ello los datos reportados como consumo aparente (Cuadro 13, Cuadro 15 y Figura 12), que se obtuvieron por la diferencia entre la cantidad aportada y la drenada incluyen a los nutrimentos absorbidos por la planta más los retenidos por el sustrato.

De los elementos nutritivos que se les llevó seguimiento, los más demandados por las plantas de tomate fueron: $K > Ca > N-NO_3^- > P$ (Cuadro 13). Sin embargo, hay que considerar que al momento de aforar los tinacos de 1000 litros en los sistemas cerrados, la solución nutritiva que se usaba era la misma que se usada en los sistemas abiertos, la cual contenía $N-NH_4^+$. Este elemento no se monitoreó, por lo tanto no se detalla su consumo.

A pesar que el cultivo en ningún tratamiento manifestó deficiencias de algún elemento, a los 92 ddt se hizo un análisis de tejido de hojas, tallo y fruto; en donde se tomó una sola muestra en la cual se incluyeron a todos los tratamientos, los resultados se muestran en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Contenido de K, Ca, N y P en fruto, tallo y hojas en plantas^x de tomate a los 92 ddt.

Órgano	K	Ca	N	P
	-----% de peso seco-----			
Fruto	3.43	0.340	2.590	0.621
Tallo	3.89	4.259	2.753	1.226
Hojas	3.65	1.013	2.170	0.982

^xPromedio de tres muestras

Jones (2005c) señala que en hojas de tomate, los intervalos normales óptimos son: nitrógeno, de 2.7 a 5.0 %; fósforo, de 0.25 a 0.7 %; potasio, de 2.5 a 5.0 % y calcio, de 0.9 a 3.2 %. Peet (2005) señalan que los rangos de suficiencia en hojas cuando la planta está madurando sus primeros frutos son: nitrógeno, de 2.0 a 3.5 %; fosforo, de 0.2 a 0.4 %; potasio, de 2.0 a 4.0 % y calcio, de 1.0 a 2.0 %. Como se puede comprobar en el Cuadro 15, con excepción de P que está ligeramente por arriba del nivel normal, los valores encontrados en hojas están dentro del rango óptimo y de suficiencia recomendados por Jones (2005c) y Peet (2005).

Al recircular la solución nutritiva los elementos que se van a reponer son los consumidos por el cultivo; establecer en el tiempo o en ciertas etapas de desarrollo el consumo de cada uno de los elementos mayores podría facilitar el manejo de los sistemas cerrados al proponerle al productor cuanto fertilizante reponer, además se reduciría el número de análisis químicos de la solución nutritiva recirculante y con ello menor gasto para el productor.

El consumo de agua entre tratamientos varió 9.1 % entre el máximo (DFT, 471.6 l·m⁻²) y el mínimo (cama abierta 428.4 L·m⁻²). Los sistemas cerrados en sustrato con respecto a sus testigos presentaron ahorros de agua de 32.6 y 35.8 % en cama cerrada y bolsa cerrada, respectivamente. El sistema DFT aprovechó 78 % del agua utilizada. El agua desechada fue menor en los sistemas cerrados con sustratos (10.9 % en cama cerrada contra 43.6 % en cama abierta y 9.3 % en bolsa cerrada contra 39.5 % en bolsa abierta); en DFT al final del ciclo se eliminan 133.2 l·m⁻² lo cual significa 22 % del gasto total, similar al porcentaje de drenaje que se considera a nivel comercial usando un sustrato. Los sistemas cerrados fueron más eficientes en el uso de agua, con valores de 27.1, 27.6 y 30.4 Kg·m⁻³ en cama cerrada, DFT y bolsa cerrada, respectivamente lo cual es consistente con lo reportado por Parra *et al.* (2009) y Montesano *et al.* (2010).

Cuadro 17. Indicadores de eficiencia en el uso del agua en plantas de tomate, cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

Tratamiento	Volumen aplicado	Desechado	Consumo del cultivo		Ahorro	Rendimiento	UEA	
-----Agua-----								
	(L·m ⁻²)	(L·m ⁻²)	(%)	(L·m ⁻²)	(L·planta ⁻¹)	(%)	(Kg·m ⁻²)	(Kg·m ⁻³)
Cama abierta	760.2	331.8*	43.7	428.4 ^z	71.4	-	13.0	17.1
Bolsa abierta	781.8	309	39.5	472.8	78.8	-	14.4	18.5
Cama cerrada	512.4	55.8	10.9	456.6	76.1	32.6	13.9	27.1
Bolsa cerrada	501.6	46.8	9.3	454.8	75.8	35.8	15.3	30.4
DFT	604.8	133.2	22	471.6	78.6	-	16.7	27.6

* Volumen calculado con el porcentaje de drenaje. ^z consumo = volumen aplicado – volumen desechado.

^y ahorro con respecto al sistema abierto. UEA: uso eficiente del agua.

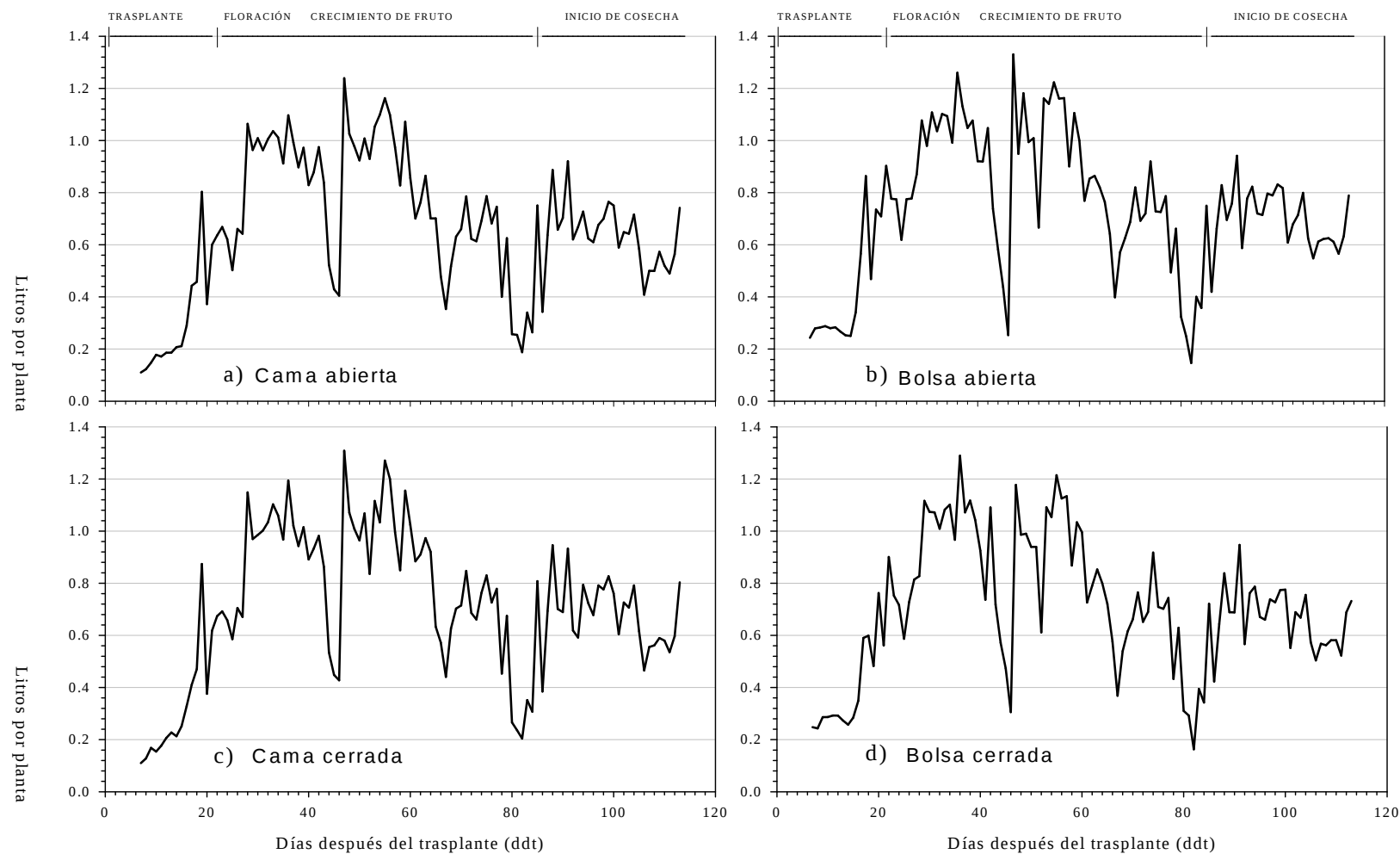
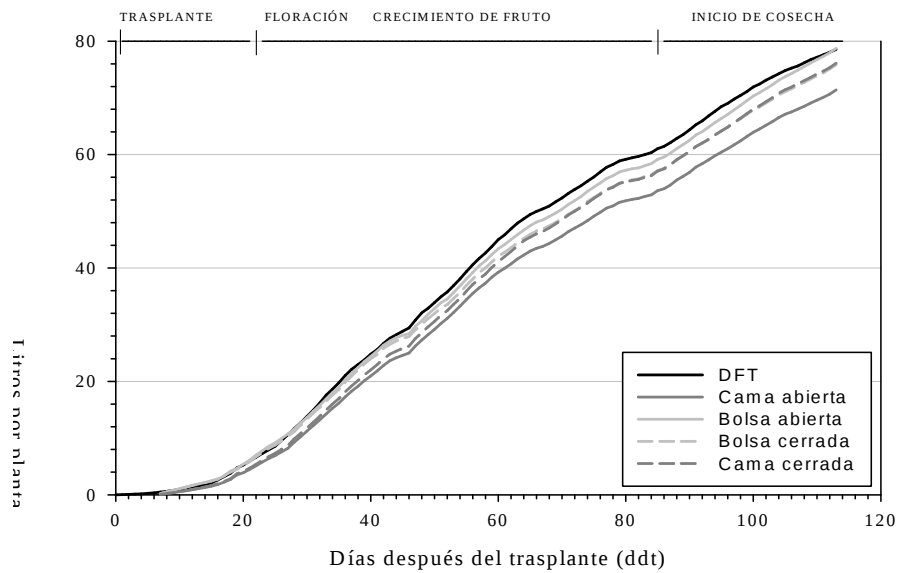
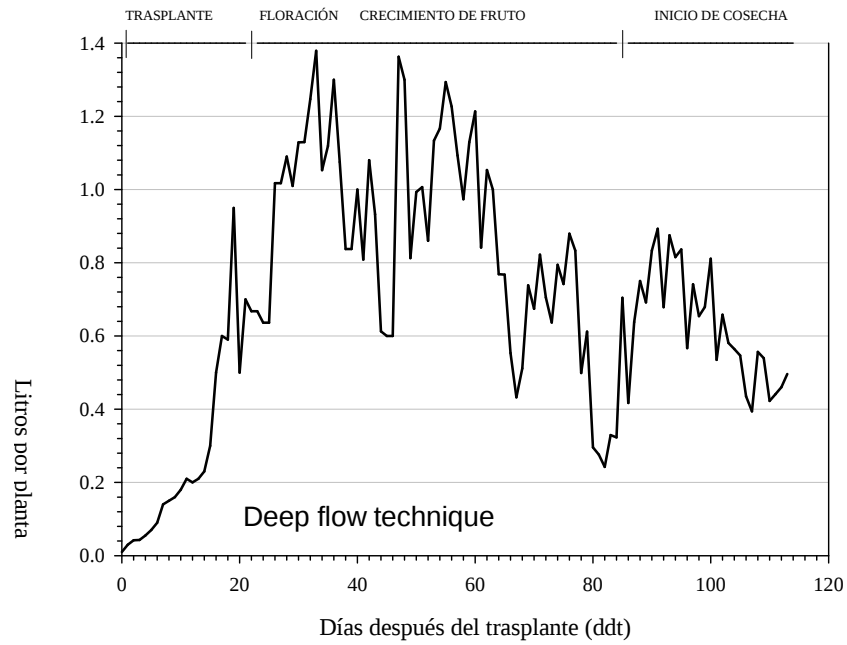


Figura 12. Consumo diario de agua en plantas de tomate cultivadas en los tratamientos sin recirculación de la solución nutritiva (a y b) y con recirculación de la solución nutritiva (c y d).



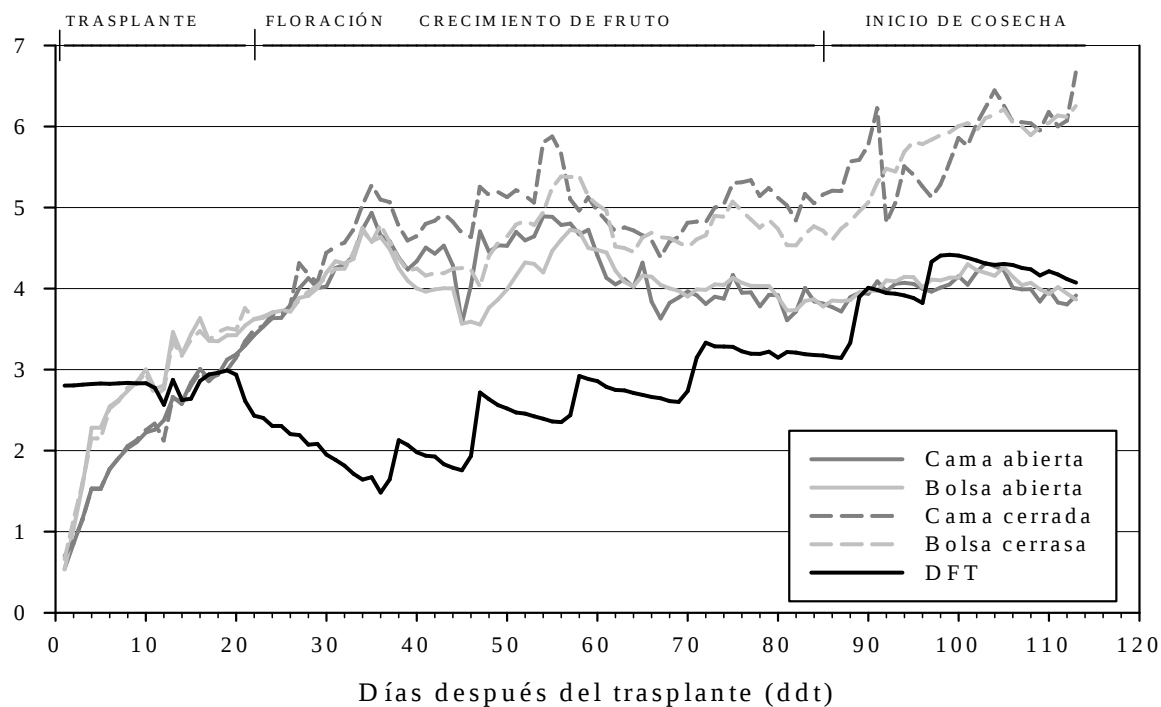


Figura 15. Promedios de CE ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) en el drenaje de la solución nutritiva en un cultivo de tomate establecido, en diferentes sistemas hidropónicos.

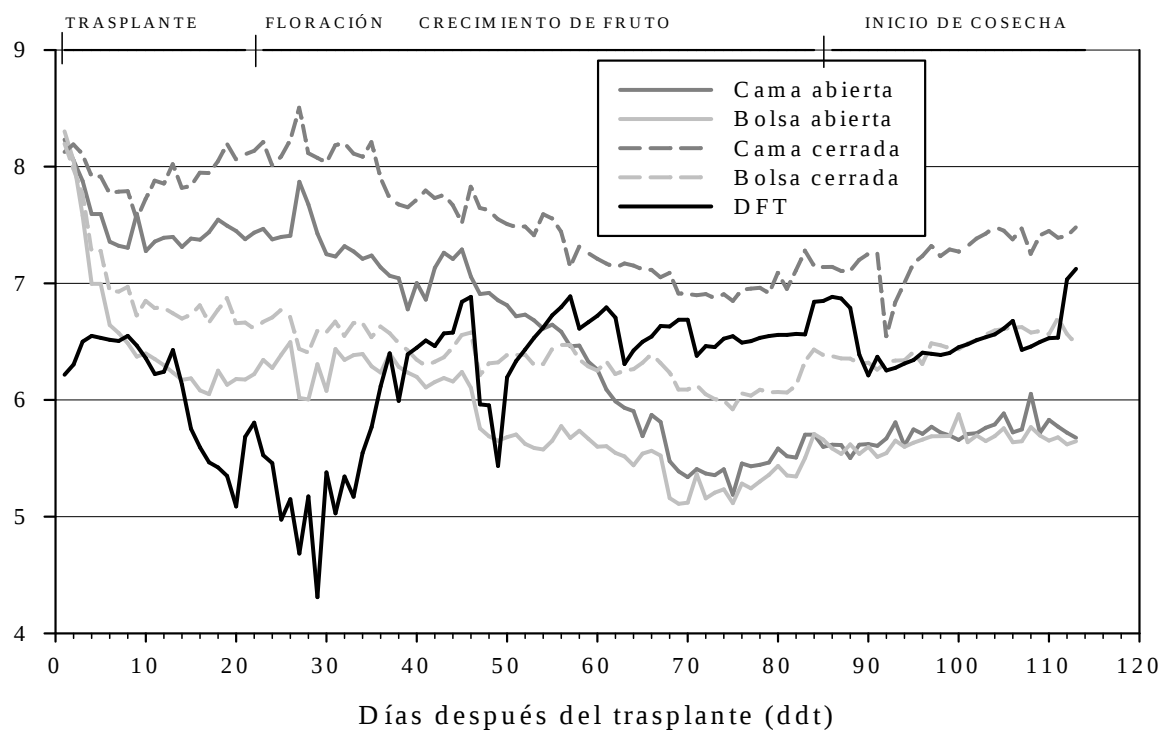


Figura 16. Promedios de pH en el drenaje de la solución nutritiva en un cultivo de tomate, establecido en diferentes sistemas hidropónicos.

4.5 Temperaturas dentro del invernadero

La temperatura influye en la tasa de crecimiento y desarrollo de muchos procesos metabólicos de las plantas. A temperaturas del aire de 23 a 24 °C los carbohidratos se transportan con mayor eficacia hacia el fruto; durante el crecimiento del fruto el cuajado no se produce por encima de temperaturas promedio superior a 30 °C (Jones, 2005c). En el presente trabajo la temperatura promedio estuvo siempre cercana a los 20 °C (Figura 17). A pesar que por momentos se presentaron temperaturas superiores a los 30 °C, los frutos alcanzaron buen tamaño y peso promedio.

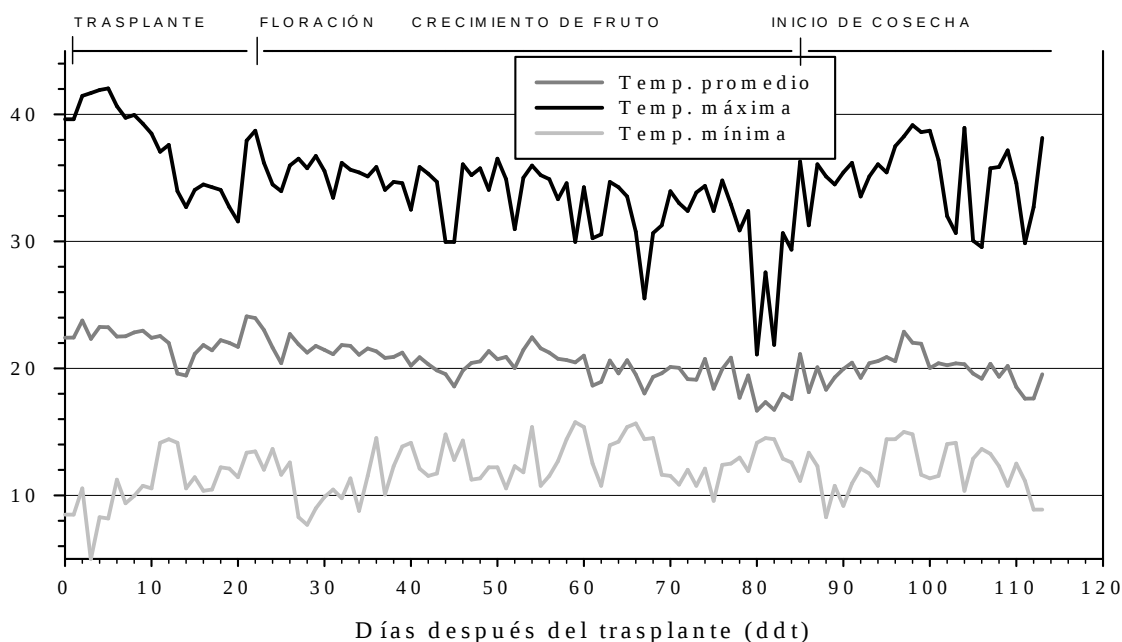


Figura 17. Temperaturas máximas, mínimas y promedio dentro del invernadero durante el desarrollo del cultivo.

El reducido volumen en el que crecen las raíces en los sistemas hidropónicos provoca muchos tipos de estrés relacionados con el medio ambiente. La temperatura máxima (Figura 18) y mínima (Figura 19) en el sistema radical fluctuó más durante los primeros días del cultivo. Camas y bolsas fueron más propensas a estas oscilaciones. La

temperatura en el tratamiento DFT fue más constante a lo largo del cultivo, las mayores diferencias entre temperaturas máximas y mínimas en el sustrato se presentaron en los primeros días. Conforme creció el follaje su sombra ayudó a reducir las variaciones entre las temperaturas máximas y mínimas.

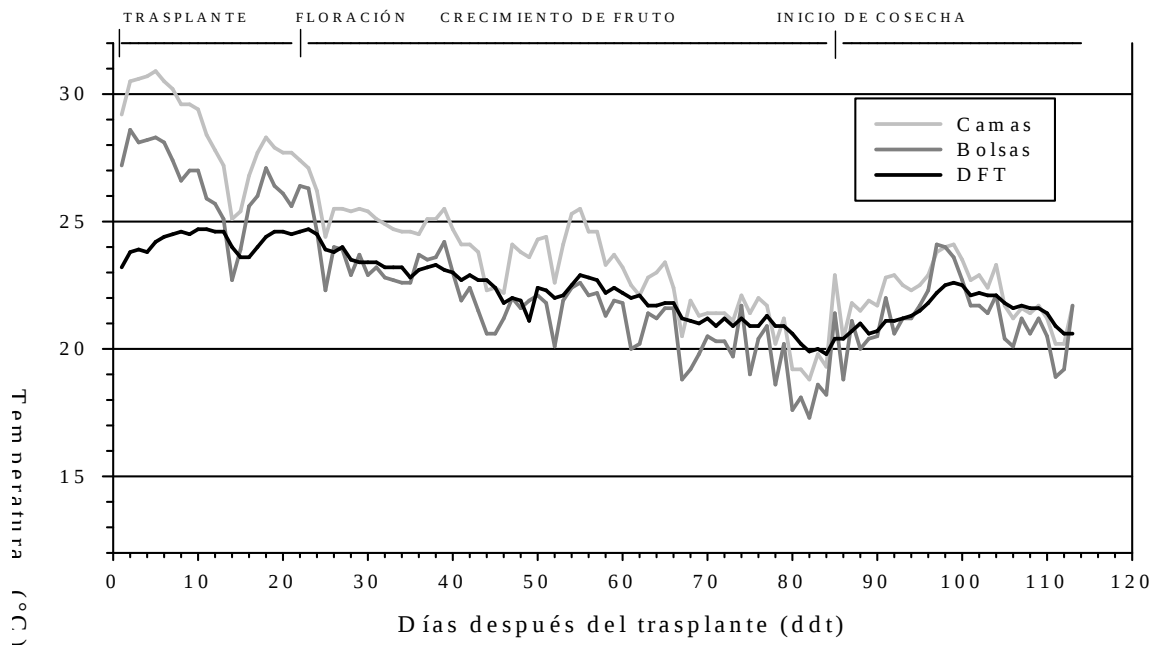


Figura 18. Temperaturas máximas en el sistema radical de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

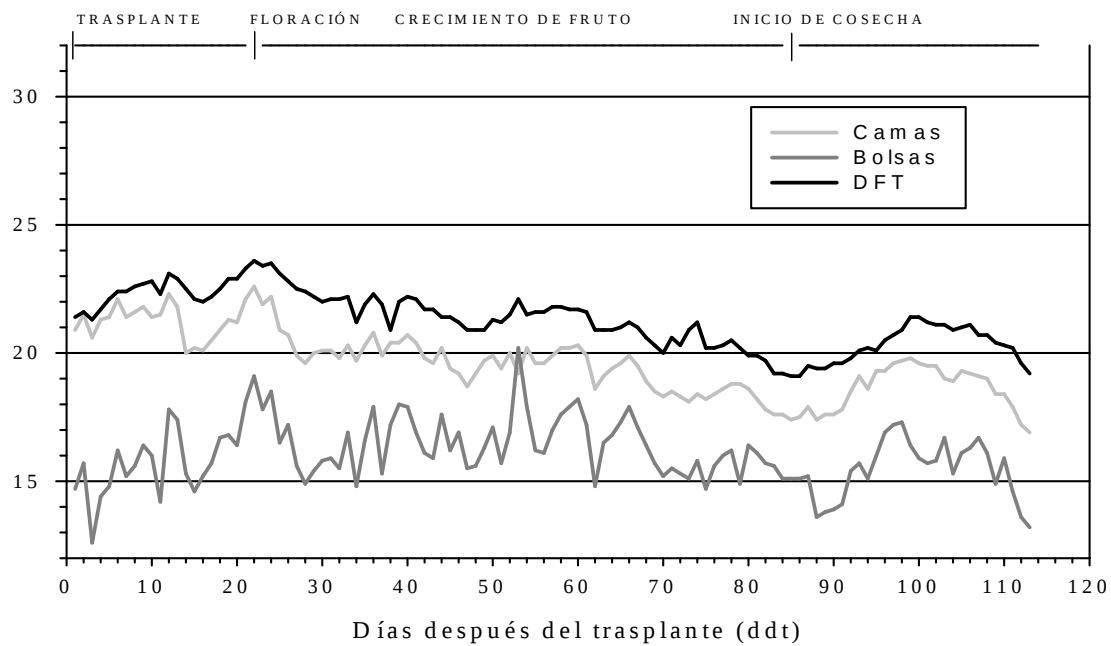


Figura 19. Temperaturas mínimas en el sistema radical de plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

5. CONCLUSIONES

1. El crecimiento y rendimiento de fruto fueron similares entre los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva, incluso con el sistema de hidroponía profunda, se alcanzó mayor rendimiento por unidad de superficie respecto a los sistemas abiertos.
2. En el sistema con recirculación de la solución nutritiva, se obtuvo un ahorro superior a 30 % de agua y superior a 40 % en nutrimentos (K, Ca, N-NO_3^- y P), comparado con los sistemas sin recirculación.

6. LITERATURA CITADA

- 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 Hort.* 559: 529-534.
- AMHPAC. 2010. Asociación Mexicana de Horticultura Protegida. www.amhpac.org
fecha de consulta: 4/abril/2011
- Asamizu, E.; Ezura, H. 2009. Inclusion of Tomato in the genus *Solanum* as “*Solanum lycopersicum*” is evident from phylogenetic studies . *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 78: 3-5.
- Bar-Yosef, B. 2008. Fertigation management and crops response to solution recycling in semi-closed greenhouses, pp. 341-424. *In: Soilless culture: theory and practice.* Raviv, M.; Lieth, J. H. (ed.). HELVISTER. USA.
- Beadle, C. L. 1988. Análisis del crecimiento vegetal, pp. 12-21. *In: Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad.* Traducción al español de la 2ª Ed. en inglés. Patrocinada por el programa ambiental de la naciones unidad (UNEP) y el colegio de postgraduados. Ed. Futura. Chapingo, México.
- 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. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 6: 414-419.
- Byrnes, B. H. 1990. Environmental effects of N fertilizer use – an overview. *Fertilizer Research.* 26: 209-215.

- Castellanos, J. Z.; Borbón, M. C. 2009. Panorama de la horticultura protegida en México, pp. 1-8. *In: Manual de la producción de tomate en invernadero.* Castellanos, J. Z. (ed.). Intagri. México.
- Castellanos, J. Z.; Ortega-Guerrero, A.; Grajeda, O. A.; Vázquez-Alarcon, A.; Villalobos, S.; Muños-Ramos, J. J.; Zamudio, B.; Martines, J. G.; Hurtado, B.; Vargas, P.; Enrique, S. A. 2002. Changes in the quality of groundwater for agricultural use in Guanajuato. *Terra* 20: 161-170.
- Castilla, P. N. 1995. Manejo del cultivo intensivo con suelo, pp. 189-225. *In: El Cultivo del Tomate.* Nuez. F (ed.). Mundi-Prensa, España.
- Chamarro, L. J. 1995. Anatomía y Fisiología de la Planta, pp. 43-91. *In: El Cultivo del Tomate.* Nuez. F. (ed.). Mundi-Prensa, España.
- Chapman, H. D.; Pratt, P. E. 1973. Método de análisis de suelos, plantas y agua. Ed. Trillas. México, D. F. 195 p.
- Chi, S. H.; Shinohara, Y.; Suzuki, Y. 1991. Effect of Concentration of Nutrient Solution on Vegetative Growth and Fruit Yield of Hydroponically Grown Tomato Plants. *Environ. Control Biol.* 29: 185-192.
- Chong, P. K.; Ito, T. 1982. Growth, fruit yield and nutrient absorption of tomato plant as influenced by solution temperature in nutrient film technique. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 51: 44-50.

- CNPH, 2009. Confederación Nacional de Productores de Hortalizas. Informe estadístico: cierre de temporada 2008-2009. Comisión para la Investigación y Defensa de las Hortalizas. 58 p.
- Cook, R.; Calvin, L. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American greenhouse tomato industry. 81p.
- Dasgan, H. Y.; Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of Tomato plants. *Acta Hort.* 697: 399-408.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1997a. pH Influenced by the elemental composition of nutrient solutions. *Journal of Plant Nutrition* 20: 911-923.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1997b. Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to dissociation reactions. *Journal of Plant Nutrition* 20: 901-910.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1998a. Cationic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of Plant Nutrition* 21: 861-870.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1998b. Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to complexation reactions. *Journal of Plant Nutrition* 21: 849-859.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1998c. Elemental bioavailability in nutrient solutions in relation to precipitation reactions. *Journal of Plant Nutrition* 21: 2103-2113.
- De Rijck, G.; Schrevens, E. 1999. Anionic speciation in nutrient solutions as a function of pH. *Journal of Plant Nutrition* 22: 269-279.

- Dhakal, U.; Salokhe, V. M.; Tantau, H. J.; Max, J. 2005. Development of a greenhouse nutrient recycling system for tomato production in humid tropics. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript BC 05 008. 7: 1-15.
- Escalante, E. J. A.; Kohashi, S. J. 1993. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para toma de datos. Centro de Botánica-Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 84 p.
- FAOSTAT, 2011. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. www.faostat.fao.org Fecha de consulta: 17/Mayo/2011.
- Flores, D.; Ford, M. 2010a. Greenhouse and Shade House Production to Continue Increasing. USDA, Foreign Agricultural Service. Global Agricultural informantion Network. USA. 10 p.
- Flores, D.; Ford, M. 2010b. Mexico Tomato Annual Area Planted Down But Production Up. USDA, Foreign Agricultural Service. Global Agricultural informantion Network. USA. 8 p.
- Gardner, F. O.; Brent, P. R.; Michell, R. L. 1990. Physiology of crop plants. Second Edition. Iowa State University Press. AMES. USA. pp. 98-208.
- Gislerød, H. R.; Kempton, R. J. 1983. The oxygen content of flowing nutrient solutions used for Cucumber and Tomato culture. *Sci. Hortic.* 20: 23-33.
- Giuffrida, F.; Leonardi, C. 2009. Nutrient solution concentrations in soilless closed system. *Acta Hort.* 807: 463-468.

- Giuffrida, F.; Lipari, V.; Leonardi, C. 2003. A simplified management of closed soilless cultivation systems. *Acta Hort.* 614: 155-160.
- Gutiérrez, M.; Alegret, S.; Cáceres, R.; Casadesús, J.; Marfà, O.; Valle Del, M. 2007. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture* 57: 12-22.
- Hao, X.; Papadopoulos, A. P. 2002. Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open or closed rockwood systems. *Can. J. Plant Sci.* 82: 771-780.
- Heuvelink, E.; Dorais, M. 2005. Crop growth and yield, pp. 85-114. *In: Tomatoes.* Heuvelink, E. (ed.). CABI Publishing. London, UK.
- Ho, L. C. 1984. Partitioning of assimilates in fruiting tomato plants. *Plant Growth Regulation* 2: 277-285.
- 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.
- Hunt, R. 1982. *Plant Growth Curves. The functional approach to plant growth analysis.* Edward Arnold (Publisher) Ltd. London. 248 p.
- Hunt, R. 2003. Growth Analysis, Individual Plants, pp. 579-588. *In: Encyclopedia of applied plant science.* Thomas, B.; Murphy, D. J.; Murray, D. (eds.). Academic Press. London.

- Ikeda, H.; Osawa, T. 1988. The effects of NO_3/NH_4 ratios and temperature of nutrient solution on growth, yield and blossom-end rot incidence in tomato. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 57: 62-69.
- Jensen, M. H. 2002. Controlled environment agriculture in deserts, tropics and temperate regions - a world review. *Acta Hort.* 578: 19-25.
- Jones, J. B. 2005a. The plant root: its roles and functions, pp. 19-28. *In: Hydroponics: a practical Guide for the Soilles Grower.* Jones, J. B. (ed.). CRS PRESS. USA.
- Jones, J. B. 2005b. Systems of hydroponic/soilless culture, pp. 117-121. *In: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower.* Jones, J. B. (ed.). CRS PRESS. USA.
- Jones, J. B. 2005c. Hydroponic cropping, pp. 167-274. *In: Hydroponics: a practical guide for the soilless grower.* Jones, J. B. (ed.). CRS PRESS. USA.
- Jones, J. B. 2008. Plant Characteristics and Physiology, pp. 55-80. *In: Tomato plant culture in the field, greenhouse and home garden.* Jones, J. B. (ed.) CRC Press. Boca Raton, Fl. USA.
- Lamas, N. M. A. 2011. Rentabilidad y financiamiento para la agricultura protegida. fideicomisos instituidos en relación con la agricultura, FIRA. Expo Agro Sinaloa 2011. www.fps.org.mx
http://www.fps.org.mx/divulgacion/index.php?option=com_remository&Itemid=269&func=startdown&id=503 Fecha de consulta: 24/Mayo/2011.

- Liang, W.; Jiang, Y.; Zhang, Y. 2006. Accumulation of soil soluble salt in vegetable greenhouses under heavy application of fertilizers. *Agric. J.* 1: 123-127.
- Lieth, J. H.; Oki, L. R. 2008. Irrigation in Soilless Production, pp. 117-156. *In: Soilless culture: theory and practice.* Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). ELSEVIER. USA.
- LÓPEZ, J.; SANTOS-PÉREZ, J.; LOZANO-TREJO, S. URRESTARAZU, M. 2003. Mineral nutrition and productivity of hydroponically grown tomatoes in relation to nutrient solution recycling. *Acta Hort.* 609: 219-223.
- Marschner, H. 1995. Ion Uptake Mechanisms of Individual Cells and Roots: short-distance transport, pp. 6-78. *In: Mineral nutrition of higher plants.* 2nd edition. Marschner, H. (ed.). Academic Press. San Diego, CA.
- Martínez, C. E; García, L. M. 1993. Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. Ediciones de Horticultura, S. L. España. 124 p.
- Massa, D.; Incrocci, L.; Maggini, R.; Carmassi, G., Campiotti, C. A.; Pardossi, A. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultura of greenhouse tomato. *Agric. Water Manage* 97: 971-980.
- Matsuda, R.; Suzuki, K.; Nakano, A.; Higashide, T.; Takaichi, M. 2011. Response of leaf photosynthesis and plant growth to altered source-sink balance in a Japanese and Dutch tomato cultivar. *Sci. Hortic.* 127: 528-534.
- Muñoz, R. J. J. 2009. Manejo del cultivo de Tomate en Invernadero, pp. *In: Manual de Producción de Tomate en Invernadero.* Castellanos, J. Z. (ed). Intagri, México.

- Muñoz-Ramos, J. J. 2003. Formulación de la Solución Nutritiva, pp. 151-180. *In*: Manual de Producción Hortícola en Invernadero. 2ª Ed. Castellanos, J. Z. (ed). INTAGRI. México.
- 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. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 79: 47-55.
- Oztekin, G. B.; Tüzel, Y.; Tüzel, I. H.; Meric, K. M. 2008. Effects of EC levels of nutrient solution on tomato crop in open and closed systems. *Acta Hort.* 801: 1243-1250.
- Páez, O. F.; Ramírez, R. G.; Ruiz, F. A. C.; Soto, J. M. F. 2007. Contaminación por nutrientes de las aguas costeras, pp. 55-67. *In*: La contaminación por nitrógeno y fósforo en Sinaloa: flujos, fuentes, efectos y opciones de manejo. Serie lagunas costeras de Sinaloa. Universidad Autónoma de México.
- Papadopoulos, A. P.; Pararajasingham, S. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review. *Scientia Horticulturae* 69: 1-29.
- 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 Hort.* 807: 445-450
- Parente, A.; Montesano, F.; Santamaria, P. 2010. Closed cycle subirrigation with low concentration nutrient solution can be used for soilless tomato production in saline conditions. *Sci. Hortic.* 124: 338-344.

- Parra, M.; Raya, V.; Cid, M. C.; Haroun, J. 2009. Alternative to tomato soilless culture in open system in the Canary Islands: preliminary results. *Acta Hort.* 807:509-514.
- Peet, M. M. 2005. Irrigation and fertilization, pp. 171-198. *In: Tomatoes.* Heuvelink, E. (ed.). CABI Publishing. London, UK.
- Pellicer, C.; Paredes, A.; Abadía, A.; Pérez, A.; Rincón, L.; Balsalobre, E. 2007. Balance de micronutrientes en un cultivo de pimiento sobre sustrato perlita con reutilización de las diluciones lixiviadas. XI Congreso SECH. *Actas de Horticultura* n° 48. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas 473:476.
- Peralta, I. E.; Spooner, D. M. 2000. Classification of wild tomatoes: A review. *Kurtziana* 28: 45-54.
- Pineda-Pineda, J.; Ramírez-Arias, A.; Sánchez Del Castillo, F.; Castillo-González, A. M.; Valdez-Aguilar, L. A.; Vargas-Canales, J. M. 2011. Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Hort.* 893: 997-1005.
- Rodríguez, P. J. E.; Sahagún, C. J.; Mora, A. R.; Gasga, P. R. 2006. Programas de cómputo para la estimación de parámetros de regresión no lineal útiles en el análisis de crecimiento de cultivos. 52^{da} reunión anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical. Sep. 24-30. San Juan, Puerto Rico. pp 90.

- Sakamoto, Y. O.; Watanabe, S.; Nakashima, T.; Okano, K. 1999. Effects of salinity at two ripening stages on the fruit quality of single-truss tomato grown in hydroponics. *J. Hort. Sci. and Biotech.* 74: 690-693.
- Salas, S. M. D; Urrestarazu, G. M. 2000. Métodos de riego y fertirrigación en cultivos sin suelo, pp. 185-53. *In: Manual de cultivos sin suelo 5.* Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.
- Sánchez, C. F.; Corona, S. T. 1994. Evaluación de cuatro variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) bajo un sistema hidropónico de producción a base de despuntes y altas densidades. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 1: 109-114.
- Sánchez, C. F.; Escalante, K. H. 1988. Hidroponía. 3ª ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sánchez, C. F.; Moreno, P. E. C.; Coatzín, R. R.; Colinas, L. M. T.; Peña, L. A. 2010. Evaluación agronómica y fisiotécnica de cuatro sistemas de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 16: 207-214.
- Sánchez, C. F.; Ortiz, C. J.; Mendoza, C. C. González, H. V. A.; Colinas, L. M. T. 1999. Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia* 33: 21-29.
- Sánchez, C. F.; Ponce, O. J. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 4: 89-94.

SAS INSTITUTE. 2002. SAS software release 6,12. Versión 9.00 SAS Institute Inc.
Cary, NC., USA.

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 Hort.* 807: 451-456.

Savvas, D.; Stamati, E.; Tsirogiannis, I. L.; Mantzos, N.; Arouchas, P. E.; Katsoulas, N.; Kittas, C. 2007. Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in closed-cycle hydroponic systems. *Agricultural Water Management.* 91: 102-111.

Scholberg, J.; Mcneal, B. L.; Jones, J. W.; Boote, K. J.; Stanley, C. D.; Obreza, T. A. 2000. Growth and canopy cacteristics of field-grown tomato. *Agron. J.* 92: 152-159.

Silber, A.; Bar-Tal, A. 2008. Nutrition of Substrate-Grown Plants, pp. 291-339. *In: Soiless Culture: Theory and Practice.* Raviv, M; Lieth, J. H. (eds.). ELSEVIER. USA.

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

Sonneveled, C.; Voogt, W. 2009b. Greenhouse horticulture, pp. 1-11. *In: Plant nutrition of greenhouse crops.* Sonnevled, C.; Voogt, W. (eds.). Springer.

- Spooner, D. M.; Anderson, G. J.; Jansen R. K. 1993. Chloroplast DNA Evidence for the Interrelationships of Tomatoes, Potatoes, and Pepinos (Solanaceae). *Am. J. Bot.* 80: 676–688.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154.
- 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 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 73: 324-329.
- Tüzel, I. H.; Meriç, M. K. 2001. Evapotranspiration of tomato plants grown in different soilless culture systems. *Acta Hort.* 559: 555-561.
- Tüzel, I. H.; Tüzel, Y.; Gül, A.; Meriç, M. K.; Yavuz, O.; Eltez, R. Z. 2001. Comparison of open and closed systems on yield, water and nutrient consumption and their environmental impact. *Acta Hort.* 554: 221-228.
- Tüzel, I. H.; Tunali, U.; Tüzel, Y.; Öztekin, G. B. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Hort.* 807: 457-462.
- Tüzel, Y.; Eltez, R. Z.; Tüzel, I. H.; Akat, O.; GÜL, A. 2002. Comparison of open and closed systems on yield and quality of greenhouse grown Tomatoes. *Acta Hort.* 579: 585-590.

- Tunali, U.; Tüzel, I. H.; Tüzel, Y.; Öztekin, G. B. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Hort.* 807: 457-462.
- Ucán, C.; Sánchez, C. F.; Corona, S. T.; Contreras, M. E. 2005. Efecto del manejo de relaciones fuente-demanda sobre el tamaño de fruto de jitomate. *Fitotecnia Mexicana* 28: 33-38.
- Urrestarazu G. M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 3ª Edición. 914 p.
- Urrestarazu, G. M. 2000. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo, pp. 51-94. *In:* Manual de cultivos sin suelo 5. Urrestarazu, G. M. (ed.). Mundi-Prensa. España.
- Van Der Velde, R. T.; Voogt, W.; Pieckhardt, P. 2008. Kasza: design of a closed water system for the greenhouse horticulture, *water science and technology* 58: 713–725.
- Van Os, E. A. 2009. Comparison of Some Chemical and Non-Chemical Treatments to Disinfect a Recirculating Nutrient Solution. *Acta Hort.* 843: 229-234.
- Vargas, T. P.; Castellanos, R. J. Z.; Muños, R. J. J.; Sánchez, G. P.; Tijerina, C. L.; López, R. R. M.; Martínez, S. C.; Ojodeagua, A. J. L. 2008. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agri. Téc. Méx.* 34: 323-331.
- Wittwer, S.; Castilla, N. 1995. Protected cultivation of horticultural crops, worldwide. *Horttechnology.* 5: 6-23.

Zekki, H.; Gauthier, L.; Gosselin, A. 1996. Growth, productivity and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121: 1082-1088.

7. ANEXO

Cuadro 1A. Análisis de varianza para de diámetro de tallo, altura de planta, ancho de copa y área foliar por planta durante el ciclo de cultivo de tomate en diferentes sistemas hidropónicos.

FV	GL	Días después del trasplante													
		17		26		38		48		59		75		90	
Carácter		Diámetro de tallo (cm)													
Tratamientos	4	0.009	**	0.013	**	0.014		0.007		0.040	*	0.022	**	0.017	
Bloques	4	0.002		0.005		0.013		0.012		0.017		0.016	*	0.017	
Error	16	0.001		0.002		0.012		0.010		0.012		0.005		0.010	
Total	24														
CV		3.23		4.16		8.86		7.76		8.25		5.46		7.84	
$\bar{X}$		0.77		1.08		1.25		1.29		1.30		1.24		1.26	
Carácter		Altura de planta (cm)													
Tratamientos	4	0.136		4.222		12.866		36.364		17.090		17.090		17.090	
Bloques	4	0.719		0.621		5.883		16.619		19.839		19.839		19.839	
Error	16	0.493		1.914		17.072		18.475		24.132		24.132		24.132	
Total	24														
CV		2.23		2.17		4.80		4.80		5.45		5.45		5.45	
$\bar{X}$		31.45		63.72		86.03		89.46		90.13		90.13		90.13	
Carácter		Ancho de copa (cm)													
Tratamientos	4	14.960		52.519	**	6.654		12.328		13.695	**	7.292		8.418	
Bloques	4	9.282		34.063		35.578	**	6.043		33.207	**	14.370		3.005	
Error	16	11.242		9.438		5.976		8.289		1.822		7.654		4.898	
Total	24														
CV		6.52		4.28		3.51		4.12		1.99		4.11		3.59	
$\bar{X}$		51.39		71.71		69.67		69.81		67.85		67.38		61.69	
Carácter		Área foliar por planta (m²)													
		25		36		51		92		-		-		-	
Tratamientos	4	0.018	**	0.045	*	0.003		0.004		-		-		-	
Bloques	4	0.002		0.048	*	0.017		0.021		-		-		-	
Error	16	0.001		0.014		0.010		0.011		-		-		-	
Total	24														
CV		10.48		15.26		9.96		10.10		-		-		-	
$\bar{X}$		0.339		0.773		1.024		1.033		-		-		-	

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 2A. Parámetros estimados de modelos logísticos para desarrollo de: altura de planta, diámetro de tallo, área foliar y ancho de copa en plantas de tomate.

Carácter	Tratamiento	Modelo	r ²
Altura de planta	Cama abierta	$y = 88.9639/(1+13.5735e^{-0.1323*ddt})$	0.97
	Bolsa abierta	$y = 89.1914/(1+12.0775e^{-0.1261*ddt})$	0.97
	Cama cerrada	$y = 89.4594/(1+12.5827e^{-0.1274*ddt})$	0.97
	Bolsa cerrada	$y = 92.0348/(1+13.8328e^{-0.1289*ddt})$	0.96
	DFT	$y = 92.8352/(1+13.8828e^{-0.1301*ddt})$	0.97
Diámetro de tallo	Cama abierta	$y = 1.22013/(1+5.7226e^{-0.1326*ddt})$	0.83
	Bolsa abierta	$y = 1.25398/(1+9.65992e^{-0.1564*ddt})$	0.77
	Cama cerrada	$y = 1.24558/(1+8.22727e^{-0.1496*ddt})$	0.88
	Bolsa cerrada	$y = 1.24806/(1+11.7331e^{-0.1684*ddt})$	0.83
	DFT	$y = 1.36355/(1+6.03211e^{-0.1360*ddt})$	0.86
Área foliar por planta	Cama abierta	$y = 1.0046/(1+202.477e^{-0.1835*ddt})$	0.98
	Bolsa abierta	$y = 0.9984/(1+111.099e^{-0.1488*ddt})$	0.92
	Cama cerrada	$y = 1.0353/(1+212.302e^{-0.1816*ddt})$	0.99
	Bolsa cerrada	$y = 1.01124/(1+193.506e^{-0.1788*ddt})$	0.95
	DFT	$y = 1.05938/(1+159.279e^{-0.1892*ddt})$	0.97
Ancho de copa	Cama abierta	$y = 67.2171/(1+6.34608e^{-0.1913*ddt})$	0.96
	Bolsa abierta	$y = 68.3192/(1+7.18883e^{-0.1902*ddt})$	0.94
	Cama cerrada	$y = 68.4624/(1+7.14955e^{-0.1857*ddt})$	0.95
	Bolsa cerrada	$y = 69.3422/(1+7.064e^{-0.1835*ddt})$	0.96
	DFT	$y = 66.0997/(1+5.88786e^{-0.1984*ddt})$	0.97

Cuadro 3A. Análisis de varianza de peso seco por planta, hojas, tallo y frutos durante el ciclo de cultivo de tomate, cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.

FV	GL	Días después del trasplante			
		25	36	51	92
Carácter		Peso seco de toda la planta (g)			
Tratamientos	4	48.994 **	208.821 **	369.412	715.359
Bloques	4	6.383	165.093 *	118.324	2193.799
Error	16	2.363	35.619	383.636	1446.509
Total	24				
CV		9.25	11.90	19.40	16.05
$\bar{X}$		16.62	50.14	100.99	236.99
Carácter		Peso seco de hojas (g)			
Tratamientos	4	4.357 **	150.569 **	191.958	210.542
Bloques	4	32.553	117.653 *	49.950	102.443
Error	16	1.863	27.814	217.417	221.934
Total	24				
CV		9.99	14.29	24.19	17.53
$\bar{X}$		13.66	36.91	60.96	85.00
Carácter		Peso seco de tallo (g)			
Tratamientos	4	1.722 **	7.346 **	36.187	62.227
Bloques	4	0.253	4.256 *	7.145	84.060
Error	16	0.108	1.313	10.471	47.597
Total	24				
CV		11.077	11.29	20.28	29.06
$\bar{X}$		2.96	10.15	15.96	23.74
Carácter		Peso seco de frutos (g)			
Tratamientos	4	-	0.423	9.553	305.184
Bloques	4	-	1.619	9.523	1041.296
Error	16	-	1.445	28.838	466.012
Total	24				
CV		-	39.15	22.31	16.83
$\bar{X}$		-	3.07	24.07	128.25

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 4A. Análisis de varianza de razón de área foliar (RAF), eficiencia metabólica del área foliar (EMAF), índice de cosecha (IC) e índice de área foliar (IAF) durante el ciclo de cultivo de tomate, cultivado en diferentes sistemas hidropónicos.

FV		GL	Días después del trasplante					
			25	36	51	92	92	92
Carácter			RAF (dm ⁻² ·g ⁻¹)				EMAF (g·dm ⁻²)	IC
Tratamientos	4		0.037	0.020	0.037	0.002	0.040	0.003
Bloques	4		0.035	0.030	0.030	0.006	0.098	0.002
Error	16		0.018	0.019	0.030	0.007	0.079	0.001
Total	24							
CV			6.57	9.00	16.68	19.37	21.13	5.91
$\bar{X}$			2.05	1.54	1.04	0.45	1.33	0.54
Carácter			IAF (m ² ·m ⁻²)					
Tratamientos	4		0.637 **	1.636 *	0.053	0.057		
Bloques	4		0.065	1.719 *	0.501	0.623		
Error	16		0.046	1.719	0.344	0.398		
Total	24							
CV			10.52	15.27	10.23	10.80		
$\bar{X}$			2.03	4.64	5.73	5.84		

*Significativo a una $p\leq 0.05$; **significativo a una $p\leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 5A. Parámetros estimados de modelos logísticos para peso seco por planta, tallo, hojas, frutos e índice de área foliar (IAF) en plantas de tomate.

Carácter	Tratamiento	Modelo	r ²
Peso seco de planta	Cama abierta	$y = 3871.19/(1+101.597e^{-0.0730*ddt})$	0.98
	Bolsa abierta	$y = 3446.55/(1+174.258e^{-0.0882*ddt})$	0.98
	Cama cerrada	$y = 3893.63/(1+90.7757e^{-0.0698*ddt})$	0.96
	Bolsa cerrada	$y = 3472.41/(1+90.8473e^{-0.0716*ddt})$	0.99
	DFT	$y = 3978.64/(1+53.3818e^{-0.0614*ddt})$	0.97
Peso seco de tallo	Cama abierta	$y = 20.2932/(1+46.2365e^{-0.0964*ddt})$	0.94
	Bolsa abierta	$y = 19.056/(1+247.475e^{-0.1497*ddt})$	0.85
	Cama cerrada	$y = 20.036/(1+46.9273e^{-0.0983*ddt})$	0.93
	Bolsa cerrada	$y = 21.4376/(1+33.6429e^{-0.0838*ddt})$	0.90
	DFT	$y = 25.0808/(1+82.9739e^{-0.1181*ddt})$	0.79
Peso seco de hojas	Cama abierta	$y = 88.4472/(1+36.7054e^{-0.0850*ddt})$	0.94
	Bolsa abierta	$y = 73.869/(1+205.591e^{-0.1391*ddt})$	0.87
	Cama cerrada	$y = 83.1148/(1+35.5671e^{-0.0873*ddt})$	0.90
	Bolsa cerrada	$y = 76.3383/(1+42.2671e^{-0.0957*ddt})$	0.92
	DFT	$y = 81.6699/(1+69.1017e^{-0.1220*ddt})$	0.85
Peso seco de frutos	Cama abierta	$y = 128.456/(1+10687.03e^{-0.1555*ddt})$	0.96
	Bolsa abierta	$y = 122.301/(1+5836.38e^{-0.1418*ddt})$	0.97
	Cama cerrada	$y = 131.442/(1+6389.02e^{-0.1417*ddt})$	0.93
	Bolsa cerrada	$y = 112.194/(1+11703.54e^{-0.1577*ddt})$	0.98
	DFT	$y = 119.522/(1+11096.78e^{-0.1551*ddt})$	0.95
Índice de área foliar	Cama abierta	$y = 5.74784/(1+244.597e^{-0.19433*ddt})$	0.97
	Bolsa abierta	$y = 5.67189/(1+107.511e^{-0.15158*ddt})$	0.91
	Cama cerrada	$y = 5.67789/(1+362.162e^{-0.20853*ddt})$	0.98
	Bolsa cerrada	$y = 5.66565/(1+257.804e^{-0.19491*ddt})$	0.95
	DFT	$y = 5.97395/(1+108.276e^{-0.17819*ddt})$	0.97

Cuadro 6A. Análisis de varianza de tasa de asimilación neta (TAN) en distintos periodos.

FV	GL	TAN		
		Días después del trasplante		
		25-36	36-51	51-92
Tratamientos	4	0.04227844	0.56772266	0.03969704
Bloques	4	0.19478934	0.41967236	0.18872324
Error	16	0.11035462	0.19798281	0.17352594
Total	24			
		13.1409	27.38642	27.77911
		2.52796	1.62472	1.49956

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 7A. Análisis de varianza de tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en distintos periodos.

FV	GL	TCC		
		Días después del trasplante		
		25-36	36-51	51-92
Tratamientos	4	2.6688409	** 1.58038206	1.3744259
Bloques	4	1.758424	* 1.01386406	6.3494337
Error	16	0.50564528	6.6987804	4.697603
Total	24			
		13.91833	35.74428	25.40313
		5.109	7.24088	8.532

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 8A. Análisis de varianza de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$, frutos $\cdot\text{m}^{-2}$, peso promedio de fruto y rezaga.

FV	GL	Rendimiento			
		$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$	Frutos $\cdot\text{m}^{-2}$	Peso promedio de fruto (g)	Rezaga ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
Tratamientos	4	9.867 **	643.122 **	0.047	1.39957 **
Bloques	4	1.280	119.395	0.04296	0.49893
Error	16	1.177	57.694	0.03214	0.219025
Total	24				
CV		7.41	5.86	5.01	36.6198
$\bar{X}$		14.65	129.57	113.08	1.278

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 9A. Análisis de varianza de $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los diferentes racimos en plantas de tomate cultivadas en diferentes sistemas hidropónicos.

FV	GL	Rendimiento		
		Racimo 1	Racimo 2	Racimo 3
		Rendimiento por racimo ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}$)		
Tratamientos	4	0.270	0.736	6.636 **
Bloques	4	0.040	0.592	0.568
Error	16	0.161	0.300	0.471
Total	24			
CV		9.15	11.07	12.90
$\bar{X}$		4.38	4.95	5.32

*Significativo a una $p \leq 0.05$; **significativo a una $p \leq 0.01$; CV: Coeficiente de variación.