

ESCUELA DE AGRONOMÍA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.

Josué Caleth Duarte Mora

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE PROFESIONAL DE INGENIERO
AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

San José, 2019

Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica.

Josué Caleth Duarte Mora

Tesis para optar al título de profesional de Ingeniero Agrónomo con el grado de Licenciado en Agronomía.

Freddy Soto Bravo, Dr.
Director de tesis

Gustavo Quesada Roldán, Dr.
Miembro del tribunal

Gabriel Garbanzo León, M.Sc.
Miembro del tribunal

Sisgo Rachith Acuña Chinchilla, M.Sc.
Miembro del tribunal

Luis Gómez Alpízar, Dr.
Director de Escuela

Josué Caleth Duarte Mora, Bach.
Sustentante

Dedicatoria

A Dios, de quien todo procede.

A mis padres,

por haberme dado la vida

y todo lo necesario para poder valerme por mí mismo.

A mi novia,

por los incontables momentos que he privado de mi compañía y atención

en aras de alcanzar esta meta.

A mi hermana,

para que valore la importancia de superarse todos los días,

ya que los tiempos suelen ser más difíciles y competitivos.

A toda mi familia,

por siempre estar ahí cuando más los necesitaba y ser el apoyo incondicional.

Josué Duarte

Agradecimiento

Deseo dejar mi más sincero agradecimiento a mi Director de tesis Dr. Freddy Soto Bravo y a los tutores Dr. Gustavo Quesada Roldán y M.Sc. Gabriel Garbanzo León, que a lo largo de este proceso de aprendizaje han sido un pilar fundamental en el finito de esta etapa.

Al todo el personal docente, administrativo y funcionarios de Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, por el apoyo incondicional durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco a FITTACORI, en su proyecto “Generación de tecnología para el manejo agronómico de híbridos costarricenses de chile dulce y tomate bajo de invernadero en Alajuela, Costa Rica” por el apoyo económico brindado para que este trabajo pudiese llevarse a cabo.

A mis familiares y amigos más cercanos que siempre me impulsaron y me comprometieron en seguir hacia adelante hasta alcanzar esta meta.

A mis colegas, Verónica Solorzano, Valerie Webb, Marco Corrales, Josué Monge, Alexander Salazar y Carlos Víquez por estar presentes durante este proceso y contribuir fielmente en las necesidades que este proyecto demandó.

Quiero hacer especial mención a Julio Vega y Luis Oreamuno quienes estuvieron siempre en constante lucha y entrega por hacer que esta investigación se diera de la mejor forma.

A todos ellos mi más sincero agradecimiento por el apoyo y fortaleza que siempre tuvieron para mi persona.

Josué Duarte

Índice

Dedicatoria	3
Agradecimiento	4
Índice de cuadros	7
Índice de figuras	7
Índice de anexos	11
Resumen	13
Introducción.....	14
Objetivos.	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos	18
Marco teórico.....	19
Metodología.....	29
Descripción de los tratamientos	29
Diseño Experimental	30
Ubicación de la investigación	32
Material vegetal.....	34
Manejo agronómico del cultivo.....	35
Manejo de riego y nutrición	37
Variables de respuesta	40
Análisis estadístico.....	45
Resultados y discusión.....	46

Evapotranspiración del cultivo (ETc).....	46
Conductividad eléctrica (CE)	48
Potencial de hidrógeno (pH)	50
Porcentaje de drenaje (%Dr)	51
Capítulo II. Eficiencia de uso de agua (EUA)	53
Capítulo III. Eficiencia de uso de nutrientes (EUN)	57
Conclusiones.....	62
Recomendaciones.....	63
Literatura consultada.....	64
Anexos	74

Índice de cuadros

Cuadro 1. Niveles de concentración de elementos aportado en cada solución nutritiva durante el desarrollo del cultivo	30
Cuadro 2. Análisis físico de la fibra de coco utilizada como sustrato en el cultivo bajo invernadero.....	36
Cuadro 3. Resumen de los efectos principales e interacción de los factores de nutrición y riego, según el análisis de varianza.	46
Cuadro 4. Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹) en el drenaje y sustrato en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey (P<0,05).....	49

Índice de figuras

Figura 1. Curva de retención de humedad de fibra de coco utilizada como sustrato; donde C.C = capacidad de contenedor, 15% = porcentaje de agotamiento del 15%; 30% = porcentaje de agotamiento del 30% y P.M.P = punto de marchitez permanente.....	29
Figura 2. Esquema de los niveles de nutrición y riego y su formación de tratamientos aplicados en la investigación.....	31
Figura 3. Distribución de los tratamientos, donde los colores indican el tratamiento: verde = Nutrición baja con 15% de agotamiento, amarillo = Nutrición media con 15% de agotamiento, rojo = Nutrición alta con 15% de agotamiento, azul = Nutrición media con 30% de agotamiento, café = Nutrición baja con 30% de agotamiento y rosado = Nutrición alta con 30% de agotamiento; el color gris con "Y" representa el borde.....	31
Figura 4. Fotografía satelital de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, el cuadro con contorno rojo demarca la ubicación en donde se desarrolló la investigación.....	32
Figura 5. Comportamiento de las condiciones climáticas internas (temperatura = T, humedad relativa = HR y déficit de presión de vapor = (DPV) en el ambiente protegido durante el período de la investigación.....	33

Figura 6. Comportamiento de las condiciones climáticas internas (evaporación y radiación solar global = RS) en el ambiente protegido durante el período de la investigación.....	34
Figura 7. Fotografías del tomate variedad Gladiador utilizado en la investigación, donde A: planta recién trasplantada y B: Planta a los 56 días después de trasplante.....	35
Figura 8. Esquema del sistema de automatización utilizado en el desarrollo de la investigación. Los cuadros indican: rojo = electroválvulas, morado = bombas eléctricas con sus respectivos tanques de solución nutritiva, verde = Sensores GS3 y tensiómetros, amarillo = tratamientos, negro = dataloggers, gris = modem y transferencia de información y rosado = celda fotovoltaica.....	39
Figura 9. Canaleta de demanda inteligente donde se miden las variables de riego.....	41
Figura 10. Instrumentos de medición A: pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod.HI98129) utilizado para las mediciones de pH y CE de solución nutritiva, drenajes y solución del sustrato y B: pluviómetros ECHO Rain (Mod. ECRN-100) para cuantificar los volúmenes de drenaje.....	42
Figura 11. Muestras compuestas de drenajes, recién evaluados los parámetros de potencial de Hidrógeno y conductividad eléctrica a la espera de su almacenaje en refrigeración.....	42
Figura 12. A: Cosecha de frutos de tomate, B: Recipientes plásticos utilizados durante las cosechas y C: Identificación de los recipientes de acuerdo con el tratamiento.....	43
Figura 13. Clasificación del calibre de tomate según norma de calidad de Wal-mart.....	44
Figura 14. Daño causado en frutos por influencia del tratamiento, A: frutos afectados por efectos de exceso de humedad “cracking” y B: frutos afectados por deficiencia de calcio “blossom-end rot”.....	44
Figura 15. Evapotranspiración del cultivo (ETc) en L planta ⁻¹ durante el experimento. Las barras indican el error estándar.....	47
Figura 16. Evapotranspiración del cultivo (L planta ⁻¹ semana ⁻¹) en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M =	48

nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	
Figura 17. Volumen total drenado (L) para cada tratamiento durante el período de investigación. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% = nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Las barras indican el error estándar.....	52
Figura 18. Volumen total aplicado (L) para cada tratamiento durante el período de investigación. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% = nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Las barras indican el error estándar.....	52
Figura 19. Porcentaje de drenaje (% Dr) en los diferentes tratamientos. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% = nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	53
Figura 20. Rendimiento acumulado (kg planta^{-1}) obtenidos de cada tratamiento. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	54
Figura 21. Volumen aplicado acumulado (L planta^{-1}) obtenidos de cada tratamiento. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	55
Figura 22. Eficiencia de uso de agua (EUA) según calibres de frutos, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M =	55

nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	
Figura 23. Eficiencia de uso de agua (EUA) según el rendimiento comercial total, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	56
Figura 24. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Nitrógeno, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	57
Figura 25. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Potasio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	58
Figura 26. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Calcio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	58
Figura 27. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Magnesio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	59
Figura 28. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Azufre, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	59
Figura 29. Eficiencias de uso de nutriente (EUN) para el elemento Hierro, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	60
Figura 30. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para el elemento Zinc, en las diferentes nutriciones y riegos. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta, M = nutrición media, 15% = agotamiento de 15% y 30% = agotamiento	60

de 30%. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	
Figura 31. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para el elemento Manganeso, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).....	61

Índice de anexos

Figura 32. El pH de los sustratos afecta la cantidad de nutrientes disponibles a las plantas. El área sombreada representa los niveles recomendados para la mayoría de los cultivos bajo invernadero.....	74
Cuadro 5. Análisis de la varianza para la variable Evapotranspiración del cultivo.....	74
Cuadro 6. Análisis de la varianza para la variable conductividad eléctrica en sustrato.....	74
Cuadro 7. Análisis de la varianza para la variable conductividad eléctrica en drenaje.....	75
Cuadro 8. Análisis de la varianza para la variable potencial de Hidrógeno en drenaje.....	75
Cuadro 9. Análisis de la varianza para la variable porcentaje de drenaje.....	75
Cuadro 10. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de primera.....	76
Cuadro 11. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de segunda.....	76
Cuadro 12. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de tercera.....	76
Cuadro 13. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos comerciales totales.....	77
Cuadro 14. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Nitrógeno.....	77
Cuadro 15. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Fósforo.....	77

Cuadro 16. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Potasio.....	77
Cuadro 17. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Calcio.....	78
Cuadro 18. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Magnesio.....	78
Cuadro 19. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Azufre.....	78
Cuadro 20. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Hierro.	78
Cuadro 21. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Zinc.....	79
Cuadro 22. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Manganeso.....	79
Figura 33. Vista panorámica de la ubicación de los tratamientos en el invernadero de la EEAFBM.	79
Figura 34. Sistema electrónico de control de los sensores en campo.....	80
Figura 35. Reservorios de solución nutritiva de los diferentes tratamientos....	80
Figura 36. Componentes del sistema de riego automático. A. Sistema de electroválvulas y B. Medidores de caudal.....	81
Figura 37. Vista desde debajo de la canaleta de demanda inteligente.....	81
Figura 38. Quinta cosecha de tomate de todos los tratamientos.....	81
Figura 39. Cantidad promedio de riegos día ⁻¹ aplicados en los diferentes tratamientos. Las barras indican el error estándar.....	82
Figura 40. Frecuencia del calibre obtenida en los diferentes tratamientos. Fragmentos de color blanco indican el rendimiento comercial total.	82
Figura 41. Análisis estadístico del comportamiento de la variable pH en los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey (p<0,05).....	83
Cuadro 23. Comportamiento de la EC y pH en la solución nutritiva aplicado en el cultivo durante la investigación.....	84

Resumen

En la actualidad, el aumento en el precio de los fertilizantes y el efecto de su uso excesivo están provocando un serio problema de contaminación al ambiente y la creciente población a nivel mundial, hace cada vez evidente la necesidad de aplicar planes de fertilización de manera racional como también un mejor uso eficiente del recurso hídrico ante la situación mundial de escasez de este recurso. El uso de herramientas tecnológicas, así como el trabajo multidisciplinario permite que día a día, los sistemas de producción se mantengan en procesos de mejora continua y constante, con la finalidad de alcanzar mejores utilidades, que permitan la inversión en el desarrollo de nuevas herramientas y tecnologías. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto del manejo del riego y la nutrición sobre parámetros de riego y de eficiencia de uso de agua y nutrientes, determinando el efecto y la interacción. Para esto se cultivó tomate bajo invernadero en un sistema hidropónico; se utilizaron seis tratamientos combinando tres niveles de concentración de nutrientes (bajo, medio y alto) con dos agotamientos (15% y 30%), estos cuentan con tres repeticiones que se distribuyeron en un diseño irrestricto al azar con un arreglo factorial de tres x dos. Las variables de respuesta fueron: evapotranspiración del cultivo (ET_c), conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrogeno (pH), porcentaje de drenaje (%Dr), eficiencia de uso de agua (EUA y eficiencia de uso de nutrientes. Se determinó que los tratamientos con una nutrición baja se alcanzó la mayor EUA y EUN. En términos de ET_c, la nutrición baja tiene el menor uso consuntivo, la CE se ve determinada por la concentración de nutrientes empleada. El porcentaje de drenaje mostró que tan eficiente fue la aplicación de riego en el cultivo. En términos de rendimiento, el mejor tratamiento fue la nutrición media con 6 kg planta⁻¹. En general la nutrición fue el factor que mayor influyó en las diferencias entre los tratamientos.

Introducción

El origen de la especie *lycopersicum* del cultivo de tomate se ubica en la región Andina, desde el sur de Colombia hasta el norte de Chile. Posiblemente desde allí fue trasladada a América Central y México, donde se domesticó (Monardes 2009). Dicho cultivo pertenece a la familia Solanaceae, una planta dicotiledónea (Cestoni et al. 2006), herbácea y perenne, que se cultiva en forma anual para el consumo de sus frutos. El tallo semi leñoso y sistema radicular está compuesto por una raíz principal de corta extensión ramificada en numerosas raíces secundarias. En la parte superior, al nivel del suelo, se desarrollan raíces adventicias que ayudan a mejorar el anclaje de la planta al sustrato (Escobar y Lee 2009; Semillaria 2015).

Cuando se cultiva el tomate en invernadero su desarrollo (crecimiento, formación de racimos florales, desarrollo de frutos, entre otros) es diferente al del cultivo a campo abierto, por efecto de las diferencias en la temperatura (Morales et al. 2006). De la misma manera, las prácticas de manejo como fertilización o podas hacen que la planta funcione de una u otra forma. Entender la fisiología de la planta de tomate ayuda a comprender cómo las prácticas de manejo del cultivo inciden en su productividad (Escobar y Lee 2009).

De todos los sectores de la economía, la agricultura es el más sensible a la escasez de agua. Usualmente, el sector agrícola es considerado como un usuario “residual” del agua, después de los sectores doméstico e industrial, sin embargo, supone el 70% de las extracciones globales de agua dulce y más del 90 % del uso consuntivo (González y Hernández 2000).

El uso del agua en agricultura está determinado por el crecimiento constante de la demanda de productos agrícolas para satisfacer las necesidades de una población en aumento. El sector agrícola cada vez tiene un reto más en búsqueda de ajustes que permita incrementar la eficiencia de uso de agua (FAO 2013).

Para aumentar la eficiencia del uso del agua se debe reducir las pérdidas en el proceso de producción. Técnicamente, “eficiencia del uso del agua” se puede calcular a cualquier escala, desde el sistema de riego hasta el punto de consumo en el campo. Generalmente se aplica a cualquier gestión que reduzca

el mal uso del agua, por ejemplo, reducción de fugas y pérdidas por evaporación durante el transporte y la aplicación del agua. La segunda opción es aumentar la productividad del agua. Esto supone obtener más cultivo o más valor por volumen de agua aplicado (Gleick et al. 2011).

Un cultivo hidropónico es un sistema aislado del suelo, utilizado para cultivar plantas cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídricos y nutricionales, a través del agua y solución nutritiva. Con la técnica de cultivo sin suelo es posible obtener hortalizas de excelente calidad y sanidad, permitiendo un uso más eficiente del agua y los nutrientes. Usualmente los rendimientos que se obtienen por unidad de área cultivada son altos debido a una mayor densidad, mayor productividad por planta y eficiencia en el uso de los recursos agua, luz y nutrientes.

El manejo adecuado de la fertirrigación de los cultivos, a través de la aplicación oportuna de fertilizantes y un uso adecuado del agua, es una parte del proceso de producción que, en combinación con otros factores, fomenta el incremento en rendimiento y la calidad de las cosechas (Ramos et al. 2002; Molina 2016).

La absorción de nutrientes es un factor importante en el cultivo de plantas de cualquier tipo. Las raíces deben absorber lo que la planta necesita para crecer sana y de un tamaño conveniente. Cuando se cultiva en suelo, las raíces crecen continuamente, para buscar los nutrientes, el agua y el aire en el suelo. En esto invierte una cantidad considerable de la energía. En el cultivo hidropónico, las raíces están continuamente en contacto con las cantidades apropiadas de nutrientes, ya que se plantan en un medio de crecimiento muy adecuado. El exceso de energía la planta la utiliza para desarrollar las partes superiores, incluyendo las flores y los frutos.

La apertura y cierre de estomas es la forma que tienen las plantas de regular la pérdida de agua. Por la noche, cuando no hay fotosíntesis y se acumula CO_2 , los estomas se cierran impidiendo la pérdida de agua. En la mañana, con el aumento de la radiación aumenta también la fotosíntesis y la demanda de dióxido de carbono (CO_2), disminuye la concentración de CO_2 en la

cámara subestomática, los estomas se abren y se produce la pérdida de agua por transpiración (Azcón y Talón 2008).

Los procesos básicos involucrados en el balance hídrico de una planta son la absorción, la conducción y la pérdida de agua. En períodos de sequía, el contenido de agua en la planta no se restablece completamente, entonces el déficit se acumula a través de los días hasta la ocurrencia de una lluvia o un evento riego aplicado. Durante el día, el balance hídrico normalmente es negativo y este suele restaurarse durante la noche, si hay suficiente agua en el suelo o sustrato.

En un sistema hidropónico, no se produce esta situación de déficit hídrico como se produce en el suelo, pero igualmente el balance hídrico de la planta puede ser negativo cuando la pérdida de agua por transpiración supera la absorción por parte de las raíces, aunque las raíces se encuentren sumergidas en la solución nutritiva (Azcón y Talón 2008).

El cultivo de tomate, similar al resto de los cultivos hortícolas, requiere una determinada cantidad de agua para obtener buenos rendimientos comerciales en épocas en las que la precipitación resulta insuficiente para el cultivo (Rojas y Castillo 2007). Además, el manejo adecuado de la nutrición y fertilización de cultivos permite mejorar el balance de nutrientes. Los programas de fertilización equilibrada producen mejores rendimientos de los cultivos.

El tomate requiere una alta disponibilidad de macronutrientes como N, P, K, Ca, Mg, S y micronutrientes como Fe, Mn, Cu, B y Zn. La absorción de macronutrientes se eleva a partir de la floración (45 días) y hasta el inicio de la maduración de los frutos (noventa días), donde se acumula la mayor cantidad de nutrientes (Jaramillo et al. 2013).

La cantidad de nutrientes absorbidos por la planta de tomate durante su ciclo depende de factores bióticos y abióticos como la temperatura del aire y del suelo, luminosidad, humedad relativa y concentración de nutrientes en el suelo. También hay otros factores como la fertirrigación, la conducción vertical de las plantas y la cobertura plástica que influyen en los niveles de extracción de nutrientes por la planta de tomate, al comparar producción en campo y en invernadero (Fayad et al. 2002).

La producción bajo invernadero tiene varias ventajas sobre la producción a campo abierto: mayor eficiencia en el uso de agua, tierra y fertilizantes, ampliación y ajuste de la temporada de siembra y cosecha, de acuerdo con la demanda del mercado. Uno de los principales factores que afectan el rendimiento es la aplicación oportuna y suficiente del riego. Una mala programación de riego también promueve la presencia de enfermedades y desórdenes fisiológicos (Adams y Ho 1993; Peet y Willits 1995).

El tomate es la tercera hortaliza que más se siembra en el ámbito nacional, con 1100 hectáreas y una producción de 57238 toneladas métricas, es decir, se producen en promedio 52034 kg ha⁻¹ (Mora y Quirós 2019). Se caracteriza por ser un cultivo intensivo, realizado durante todo el año por pequeños y medianos productores y cuya producción se concentra en el Valle Central. (López y Quirós 2016).

El 90 % de la producción se realiza a campo abierto (época seca) o en un ambiente semiprotegido (época lluviosa), mientras que el 10 % restante se efectúa en un ambiente protegido. En 2015 la actividad generó ganancias cercanas a los USD 37 millones y el consumo per cápita fue de 17,3 kg (López 2016). La producción mundial de tomate está en constante crecimiento, no solo por el aumento de las áreas cultivadas, sino también porque los agricultores aplican tecnologías que les permiten elevar los rendimientos (Díaz 2014).

Los rendimientos obtenidos en tomate en la región Central Occidental, se ubican entre 35000 kg ha⁻¹ y 80000 kg ha⁻¹, con densidades de siembra que oscilan entre 12000 y 16000 plantas ha⁻¹ obtenidos en campo abierto. Por otra parte, en ambientes protegidos se reportan rendimientos de 150000 kg ha⁻¹, con densidades de siembra entre 20000 plantas ha⁻¹ y 22000 plantas ha⁻¹ (Díaz 2007).

La mayoría de los estudios se han sido realizado en cultivos en suelo a campo abierto, muy pocos en sustrato bajo invernadero, enfocados en evaluar el efecto del agotamiento hídrico sobre el rendimiento y la calidad del producto, sin relacionarlo con el estado hídrico de la planta y con el clima.

En la actualidad, la situación hortícola se ha visto marginada por aspectos políticos y económicos, haciendo que esta actividad sea menos rentable. Por lo

tanto, se buscan nuevas tecnologías que promuevan la eficiencia en recursos y el recorte en gastos para hacer esta actividad más rentable.

Aunado a la situación actual, el aumento en el precio de los fertilizantes y el efecto de su uso excesivo sobre la contaminación del ambiente, en la actualidad, se hace más evidente la necesidad de aplicar los nutrimentos de manera racional como también el manejo eficiente del recurso hídrico ante la situación mundial de escasez de este recurso.

Objetivos.

Objetivo general

Evaluar el efecto del manejo del riego y la nutrición sobre parámetros de riego y de eficiencia de uso de agua y nutrientes en tomate bajo invernadero.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto del incremento en la concentración de nutrientes sobre parámetros del manejo del riego, según el contenido de humedad en el sustrato, en tomate bajo invernadero.
- Determinar el efecto del incremento en la concentración de nutrientes sobre la eficiencia de uso de agua, según el contenido de humedad volumétrica en el sustrato, en tomate bajo invernadero.
- Determinar el efecto del incremento en la concentración de nutrientes sobre la eficiencia de uso de nutrientes, según el contenido de humedad volumétrica en el sustrato.

Marco teórico

Dentro de la horticultura mundial, el cultivo de tomate constituye uno de los rubros de mayor dinamismo. De la familia de las solanáceas, el tomate es una planta herbácea cuyo hábito de crecimiento puede ser determinado o indeterminado. Puede ser cultivada de diversas formas, además es posible planificar la cosecha según el objetivo deseado. Parte de las producciones pueden ser destinadas a procesos industriales o consumo fresco, siendo esta última la de mayor diversificación productiva, debido a que el tomate puede ser cultivado en una alta gama de condiciones durante todo el año (Alvarado 2009).

El auge de la producción de plantas en hidroponía durante los últimos años ha estimulado el empleo de materiales diferentes a suelo, ya que se ha demostrado que sembrar en sustratos es una práctica segura, factible y altamente productiva. Su utilización es clave en la mejora del rendimiento y calidad de la producción hortícola, además de implicar un menor impacto ambiental si se compara con la producción tradicional empleado en suelo.

Los sistemas hidropónicos son muy usados en la producción de hortalizas en invernadero. Estos sistemas tienen un alto grado de eficiencia en el uso del agua por lo que el área de riego es reducida, debido a que el crecimiento radical no necesita crecer en exceso. Lo anterior implica que los nutrientes estén disponibles en las cantidades óptimas (López et al. 2011; Cuervo et al. 2012).

La hidroponía se usa para desarrollar plantas en solución nutritiva (SN) a base de agua y nutrientes, con o sin el uso de un medio o sustrato. La solución nutritiva debe tener la proporción adecuada de nutrientes en forma iónica (aniones y cationes), necesaria para que las plantas puedan absorberlos (Baca et al. 2016).

El sistema mayoritariamente empleado es el de cultivo en contenedor, empleando principalmente fibra de coco. El suministro de dicho sustrato es en forma de ladrillo deshidratado y comprimido, que es la presentación que menor grado de variación de las características físicas y químicas presenta (Cuervo et al 2012).

Los sustratos deben servir de soporte a la planta, ser livianos, tener un alto porcentaje de espacio poroso (80%), una elevada capacidad de retención de humedad, una buena aireación y un drenaje apropiado, una baja tendencia a la compactación y estar libres de patógenos, semillas y malezas (Escobar y Lee 2009).

Los sistemas hidropónicos en los que se utilizan sustratos se conocen como abiertos, cuando el exceso de SN que drena de estos se dirige al suelo, infiltrándose al subsuelo (AlShrouf 2017) o en el mejor de los casos se usa fuera del invernadero en un cultivo alterno (Savvas 2003). Los sistemas abiertos requieren de un alto consumo de agua por presentar un gran desperdicio de ella, lo que representa un costo elevado y un impacto negativo en el ambiente (Pardossi et al. 2011; Sánchez et al. 2014; Moreno et al. 2015).

En los sistemas hidropónicos cerrados, donde sí existe recirculación de SN, es más eficiente el uso del agua y los nutrimentos que se aplican para el crecimiento y desarrollo de un cultivo, ya que la SN que drena del sistema (drenaje) es captada y utilizada nuevamente en el mismo sistema de producción; sin embargo, un aspecto que limita la reutilización de la SN y con esto la eficiencia en el uso del agua y de los nutrimentos es la obtención de un rendimiento menor, disminución de la calidad, acumulación de toxinas (fitotoxicidad) deficiencias minerales y el riesgo de diseminación de microorganismos que causan enfermedad en la raíz del cultivo (Déniel et al. 2006; Sánchez et al. 2014).

Las plantas de tomate se desarrollan mejor con temperaturas de entre 18 °C y 24 °C (Díaz 2007). La humedad relativa (HR) óptima, se ubica entre 60 % y 80 %, esto favorece el desarrollo normal de la polinización y garantiza una buena producción. El exceso o déficit de HR produce desórdenes fisiológicos y favorece la presencia de enfermedades (Zamora 2016). En Costa Rica las principales áreas cultivadas comercialmente se concentran en el Valle Central; su altitud oscila entre los 700 y los 2000 msnm (Bertsch 2006).

Una humedad relativa cercana al ideal está en el rango de 55 a 60 % durante la noche y de 80 a 90% durante el día (Zamora 2016; López y Benavides 2014).

La Luz Diaria Integrada (DLI) es la cantidad de PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz y duración. En el cultivo de tomate se considera una DLI de 14-20 mol día⁻¹ de buena calidad bajo condiciones de invernadero, por debajo de 14 mol día⁻¹ es una calidad mínima aceptable y por encima de 20 mol día⁻¹ se tiene alta calidad (Torres y López 2010).

El déficit de presión de vapor (DPV) es un valor útil para expresar el flujo de vapor en un invernadero. Permite conocer la tendencia del flujo hacia condensación o transpiración. Altos valores de DPV propician la transpiración del cultivo a expensas de la humedad del sustrato y de los tejidos vegetales. Valores bajos del DPV indican cercanía al punto de rocío, generándose condiciones de condensación que es muy dañina bajo condiciones de invernadero (Bakker 1990).

El DPV es útil no sólo para conocer la demanda evaporativa del ambiente, sino también para identificar condiciones ambientales propicias para el desarrollo de enfermedades. Por ejemplo, Prenger y Ling (2001) mencionan una regla práctica de sobrevivencia de hongos patógenos cuando los valores de DPV se encuentran por abajo de 0,43 kPa, siendo su actividad más dañina para valores de DPV por debajo de 0,20 kPa. Por otra parte, valores óptimos del DPV para evitar el cierre de estomas se encuentra en el rango de 0,5-1,5 kPa.

En los últimos años muchos productores han incursionado en la producción en invernaderos de baja inversión, buscando aprovechar las potenciales ventajas socioeconómicas, agronómicas y ambientales que el sistema presenta.

Desde la parte agronómica, la protección contra los factores climáticos extremos del trópico (lluvia, radiación, humedad relativa, vientos) favorece el manejo integrado de plagas y enfermedades, reduce el uso de pesticidas y permite realizar un uso eficiente del agua y los fertilizantes, además de mitigar la contaminación ambiental (Ramírez y Nienhuis 2012; Wittwer y Castilla 1995; Castilla 2004; Gil-Vázquez et al. 2003; Fajardo et al. 2016).

Actualmente, existe la tecnología para realizar fertirriego de precisión en cultivos bajo ambientes protegidos. Sin embargo, esta técnica no se aprovecha del todo, observándose una tendencia a aplicar excesos de agua y fertilizantes

(Thompson et al. 2007). La automatización del fertirriego mediante equipos de riego provistos de sensores ambientales, aunado a los parámetros de desempeño fisiológico de las plantas, permiten el monitoreo y la interpretación en tiempo real de los datos de clima, sustrato y plantas. De esta manera se genera una guía para la toma de decisiones respecto al manejo del riego y la fertilización, ajustando el aporte de agua y fertilizantes a la demanda del cultivo (Mohammad et al. 2013).

La canaleta de demanda inteligente integra dispositivos para medir frecuencia de riego, con la que determina cuando debe ser regado. Cuenta, además con un lisímetro, el cual se encarga de generar un conteo de drenaje y un algoritmo de control de drenaje que determina cuanto hay que regar (Huertas 2019).

El principal objetivo de la canaleta es aplicar un volumen de agua determinado según el porcentaje de agotamiento de humedad volumétrica en el sustrato. Cuando a esta canaleta se le ajusta un nuevo porcentaje de drenaje o un porcentaje de agotamiento determinado, el equipo deberá tener la capacidad de ajustar en un corto plazo la frecuencia de riego junto con el porcentaje de drenaje reprogramado (Huertas 2019).

En el fertirriego se garantiza un suministro de nutrimentos directamente en el bulbo de humedecimiento, sitio donde se encuentra el mayor volumen de raíces absorbentes (Imas 2009). Esto favorece la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes, lo que mejora su distribución y localización. Si se emplea este recurso en forma adecuada, con el aporte de los nutrimentos que la planta demanda en el tiempo y la cantidad precisa para cada etapa fenológica, la mejora en el rendimiento alcanzado y en parámetros de calidad de la fruta (tamaño, firmeza, sanidad, sólidos solubles) es notable (Rincón 2003; Alcántar et al. 1999).

Monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero. Dar seguimiento al contenido de humedad del suelo puede ayudar a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como determinar la cantidad de agua a aplicar y cuándo aplicarla. También permite igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada

con el riego; y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos, o por el contrario aplicar una cantidad insuficiente (González 2008; López et al. 2011).

En términos fisiológicos, a medida que el suelo se deseca, el agua remanente no está igualmente disponible para la planta. La mayor disponibilidad de agua ocurre cuando el suelo está a capacidad de campo, disminuyendo gradualmente a medida que el suelo pierde humedad. A fin de conocer los requerimientos de agua de la planta se utilizan instrumentos como los tensiómetros, que sirven para determinar la disponibilidad del líquido en el suelo. Estos deben ser colocados en el área de riego, a la profundidad donde se ubique la mayor cantidad de raíces activas (Baker 1990; Campbell 1990).

El agua se mueve desde el tubo del tensiómetro a través de la cápsula porosa de cerámica hacia el suelo en respuesta a la succión del agua de este (cuando el agua se evapora del suelo o cuando la planta extrae agua del suelo). El agua también se puede mover desde el suelo al tensiómetro durante el riego. A medida que el tensiómetro pierde agua, se genera un vacío en el tubo y éste es registrado por el manómetro. La mayoría de los tensiómetros tienen un manómetro graduado de 0 a 100 (centibars o kilopascales). Una lectura de 0 indica un suelo saturado. Conforme el suelo se seca, la lectura en el medidor aumenta (Campbell 1990).

En el cultivo de tomate, los máximos rendimientos se obtienen efectuando el riego cuando los tensiómetros ubicados a una profundidad de 25 cm a 50 cm marcan de 50 a 70 centibares (Alvarado 2009).

Técnicas de monitoreo más sofisticadas se basan en la capacitancia del suelo, tales como sondas FDR (Frequency Domain Reflectometry) y TDR (Time Domain Reflectometry). La sonda capacitiva está compuesta por una barra sobre la cual está impreso un circuito eléctrico que conecta sensores. Éstos se pueden montar cada 20 centímetros hasta una profundidad de unos 100 cm en el caso de tomate. Una estación de monitoreo puede registrar el contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades de suelo. Cabe destacar que todos los sensores de agua en el suelo deben instalarse en la zona del bulbo húmedo, cercano al lateral o cinta de riego (Lagunas 2013).

La técnica TDR utiliza la correlación existente entre el tiempo de tránsito de una onda electromagnética introducida en el suelo, la constante dieléctrica de éste y el contenido volumétrico de humedad. La constante dieléctrica del suelo es la propiedad que determina dicho tiempo de tránsito (Cassel et al. 1994).

El agua por su parte cuenta con una constante dieléctrica muy alta (78) en comparación con los demás compuestos presentes en el medio de crecimiento de la raíz. Al medir la magnitud de la constante dieléctrica en una porción representativa de sustrato, la sonda capacitiva estima el contenido de humedad integrando todas las constantes y generando una relación. Por lo tanto, a mayor porcentaje de agua por unidad de volumen, mayor constante dieléctrica (Rivas 2017).

El uso del agua para fines agrícolas es un tema central en cualquier debate sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70 % del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos (FAO 2013).

La escasez de agua dulce para riego podría duplicar los efectos perjudiciales del cambio climático en la agricultura, debido a la reducción de los rendimientos de cultivos básicos para la alimentación mundial como son maíz, soja, trigo y arroz (Elliott et al. 2014).

Lo anterior plantea la necesidad de realizar un uso eficiente del agua dulce disponible en el planeta. Diferentes criterios asociados a la interacción medio de cultivo-planta-atmósfera han sido utilizados mediante monitorización en tiempo real para el manejo de precisión del riego.

Es necesario ajustar los sistemas de abastecimiento de agua para proporcionar servicios a la demanda, utilizando tecnologías de la información, como sensores de la humedad del suelo. La estimación de la evapotranspiración puede darse a partir de datos satelitales o bien sensores de medición directa, de manera que se pueda aumentar la eficiencia y la productividad del uso del agua en la agricultura (Huertas 2019).

Para incrementar la eficiencia de uso de agua (EUA), se utilizan técnicas de aplicación de un déficit en el riego para generar un “estrés controlado” en la planta. Esta técnica permite aumentar la eficiencia en el uso del agua de cultivo reduciendo la cantidad de agua aplicada con riego (Kirda 2002; Pereira et al. 2002).

Según Agbemafle et al. (2015); Campillo et al. (2017), un porcentaje de agotamiento del 10-20% en la cantidad o volumen de agua aplicada en el cultivo de tomate, produce frutos con una calidad óptima que compensaría las pérdidas de rendimiento. Según Allen et al. (1997), en cultivos tipo solanáceas, el déficit permitido de manejo de riego es de un 30%.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) o productividad del agua (PA) es la relación existente entre la biomasa presente en un cultivo por unidad de agua utilizada por éste en un determinado momento. Cuando se pretende enfocar el empleo del agua por un componente meramente productivo y económico, se recurre a sustituir la biomasa por el rendimiento en kg de producto por m³ de agua utilizada (Fernández y Camacho 2005).

Un estudio realizado por González y Hernández (2000) en México demuestran que alcanzan una EUA de 5,5 kg comercial m⁻³ en campo abierto. Por otra parte, Flores et al. (2007) mencionan que alcanzaron valores de EUA de 35 kg m⁻³ a una densidad de 4,3 plantas m⁻² bajo condiciones de invernadero en México. En Almería, España, Fernández y Camacho (2005) reportan que la producción de tomate se obtiene con una EUA de 37 kg m⁻³. Pardossi et al. (2004), mencionan que en Holanda se ha podido incrementar la productividad del agua en 36,4 kg m⁻³. Sin embargo, según Salazar et al. (2014), reportan valores de EUA en tomate de 45 kg m⁻³ en un invernadero con calefacción e inyección de CO₂ en Holanda.

La aplicación del riego en el cultivo de tomate debe ser cuidadosa, ya que tanto la sequía como el exceso de agua repercuten en la calidad y producción del fruto. Se ha encontrado una correlación estrecha entre sequías intensas y rajaduras en el fruto. El exceso de agua se asocia con la presencia de enfermedades radicales de la planta y por consecuencia con bajos rendimientos (Manjarrez 1980).

Cuando hay escasez de agua en el cultivo de tomate se produce una reducción del crecimiento de las plantas, la absorción del calcio se ve disminuida y se genera un desequilibrio por deficiencia de este elemento. La floración se ve afectada y se pueden perder algunos racimos. Por el contrario, cuando se aplica agua en exceso, las raíces se mueren y se presenta un retraso en la floración y en los frutos (Tjalling 2006).

Una adecuada determinación de la disponibilidad de agua determinará en gran parte el éxito de la producción de tomates. Como en todas las hortalizas, la escasez de agua de riego afectará fuertemente el rendimiento y calidad del cultivo (Mohammad et al. 2013).

El concepto de evapotranspiración nace como consecuencia de la dificultad de separar e identificar la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos de una superficie amplia y uniforme. El uso consuntivo o evapotranspiración de los cultivos es un componente básico del ciclo hidrológico, particularmente importante en regiones áridas o semiáridas del mundo y en las áreas tropicales donde el riego suplementario ha empezado a crecer (González y Hernández 2000; Jara y Valenzuela 2000).

Existen varios métodos para el cálculo de la evapotranspiración, desde métodos de cálculo directo como la utilización de lisímetros o los balances de agua en el suelo a métodos indirectos, principalmente ecuaciones empíricas basadas en variables climáticas. De estas últimas las más sencillas son las basadas en la medida de la temperatura (Thornthwaite 1948; Blaney y Criddle 1950). Existen otras ecuaciones, igualmente empíricas, que se basan en la radiación, Priestly-Taylor, o la de Jensen-Haise que combina estas dos variables (Villar y Elías 1996). Más rigurosas resultan aquellas fórmulas basadas en la combinación del balance energético y el transporte convectivo del vapor de agua (Penman 1948, adaptada por Monteith y Unsworth 1990).

Un estudio realizado por Flores et al. (2007) en México, indican valores de ETc diaria que va desde 0,2 L planta⁻¹ en etapas iniciales hasta 1,5 L planta⁻¹ en la etapa de máxima demanda. Por otra parte, León y Cun (2001), reportan valores de ETc de 179,95 mm totales y 1,98 mm diarios, estos obtenidos en Cuba y en ambas localidades en condiciones de ambiente protegido.

La fertilización tiene un papel fundamental en la producción de tomate, al ser un cultivo que necesita altas demandas de ciertos elementos en fases puntuales, de esta manera, en el plan de abonado resulta primordial aportar los nutrientes necesarios en el momento adecuado. En el caso de detectar una deficiencia esta debe ser corregida a tiempo (Escalona y Pire 2008).

Un adecuado programa de manejo nutricional sólo se puede hacer cuando hay una comprensión clara del rol de todos los nutrientes. En consecuencia, el crecimiento de los cultivos está estrechamente vinculado a una adecuada nutrición mineral. El conocimiento de la extracción que realiza la planta de los elementos en el suelo se convierte en una información básica para el diseño y planificación de programas de fertilización (Escalona y Pire 2008).

El cultivo de tomate se desarrolla adecuadamente en un pH entre 5,0 a 6,8. Es considerado moderadamente sensible a la salinidad, debido a que el promedio del umbral es de $2,3 \text{ mS cm}^{-1}$ (Zamora 2016). Según Jones (2008) y Hochmuth y Hochmuth (1996), en la solución nutritiva se debe manejar entre 2,0 a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ de conductividad eléctrica (CE) y entre 5,0 a 6,0 de pH, para una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de la planta.

Un estudio efectuado por Magán (2003), evidencia que el aumento de la salinidad tiende a reducir significativamente la producción fresca de tomate. Sin embargo, en dicho estudio se observan diferencias en EC por encima de 4 mS cm^{-1} , es decir que por debajo de este parámetro no existe efecto de reducción en parámetros de producción.

Una elevada concentración de sales en el medio radical provoca, por una parte, estrés hídrico debido a la disminución del potencial hídrico del medio radical (efecto osmótico) y por otra, la absorción de determinados iones que pueden provocar una acumulación de éstos en los tejidos vegetales alcanzando niveles tóxicos (toxicidad iónica específica) e induciendo además desequilibrios nutricionales (Munns et al. 1982).

Una fertilización eficiente es aquella que proporciona los nutrientes en las cantidades suficientes y en el momento en que el cultivo tiene la mayor demanda. A través de la fertilización se aplica el elemento faltante y se mantiene un equilibrio adecuado entre los elementos del suelo y la planta. Para calcular la

cantidad de fertilizante que se debe aplicar es necesario conocer las necesidades del cultivo (Jaramillo et al. 2007).

A nivel agronómico, el mal manejo del riego y fertilizantes, por exceso o déficit, disminuye los rendimientos y consecuentemente la rentabilidad de los sistemas agrícolas. Además, un aporte excesivo de agua y nutrientes minerales genera una contaminación. Es evidente que el mejoramiento en la eficiencia de uso de dichos recursos debe enfocarse en el manejo optimizado del riego y la fertilización (Tilman et al. 2002; González y Pomares 2008; Arizaleta 2002; Jones 2008).

La eficiencia agronómica y la recuperación relativa de los minerales permiten conocer con cual dosis de elementos, el cultivo alcanza su máxima producción y en cual porcentaje ese elemento es absorbido por las plantas (Janssen 1998).

Para el cultivo de tomate no se ha dado un estudio tan detallado en cuanto a la eficiencia de uso de nutrientes. En su mayoría la información que existe es en referencia a la extracción de elementos en las diferentes partes de la planta. Para los cereales se ha definido un rango de eficiencia de uso de nutrientes donde se menciona de 0,3-0,5 kg kg⁻¹ (Dobermann 2007).

Según Betancourt y Pierre (2013), la extracción total por la planta de tomate es de 970, 358, 147, 2603 y 405 mg por planta de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Según Isherwood (1990), la tasa de eficiencia de uso de nutrientes en general para los casos de N, P y K es de 50-70%, 10-25% y 50-60%, respectivamente.

Ojodeagua et al. (2008) mencionan una eficiencia en el uso de nutrimentos de 2.7, 1.0, 4.5, 3.1 y 0.9 kg t⁻¹ de fruta comercial de N, P₂O₅, K₂O, Ca y Mg, respectivamente, en un suelo que no había sido usado previamente para la horticultura. Por otra parte, según Arévalo (2015), en el cultivo de chile de color se alcanzaron en promedio eficiencias de uso de nutrientes de 51%, 15%, 92%, 38%, 40% y 12% para los elementos N, P, K, Ca, Mg y S respectivamente.

Metodología

Descripción de los tratamientos

En el caso de los dos niveles de riego, se refieren a porcentajes de agotamiento del agua total disponible, planteados de acuerdo a la curva de retención de humedad del sustrato. De acuerdo con lo anterior, se definieron de la siguiente forma (Figura 1):

1. Riego deficiente manteniendo la humedad aproximada a la capacidad de campo (15 % de agotamiento).
2. Riego deficiente para mantener la humedad próxima al contenido de agua de reserva (30 % de agotamiento).

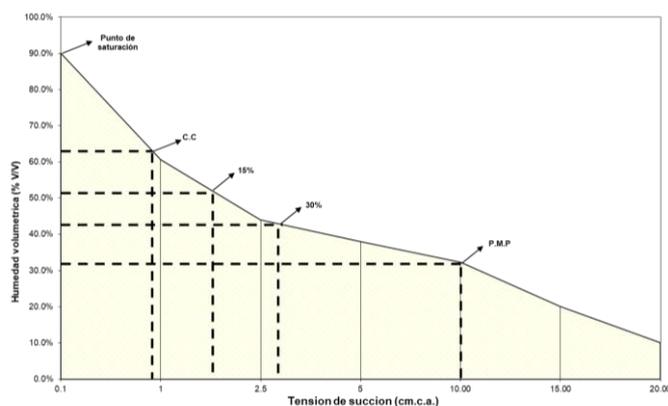


Figura 1. Curva de retención de humedad de fibra de coco utilizada como sustrato; donde C.C = capacidad de contenedor, 15% = porcentaje de agotamiento del 15%; 30% = porcentaje de agotamiento del 30% y P.M.P = punto de marchitez permanente. Fuente: FICO, adaptación propia.

La preparación de las soluciones nutritivas se llevó a cabo manualmente en tanques independientes, añadiendo la cantidad calculada de los distintos fertilizantes a un volumen de agua de 2500 L, con el fin de conseguir mayor exactitud y poder controlar mejor el consumo de nutrientes del cultivo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Niveles de concentración de elementos aportado en cada solución nutritiva durante el desarrollo del cultivo (Soto 2017).

	mg L ⁻¹											
Nivel	Ca	K	Mg	N	S	P	Fe	Cu	Mn	Zn	B	Mo
Bajo	75	100	20	70	18	17	0,5	0,02	0,25	0,05	0,25	0,05
Medio	150	200	40	140	64,7	35,4	1	0,3	0,8	0,3	0,5	0,1
Alto	225	300	60	210	97	53,1	2	0,5	1,2	0,5	1	0,1

Las concentraciones de las diferentes soluciones nutritivas se establecieron de acuerdo con recopilación de información. Dichas concentraciones, además, según las fuentes utilizadas se estimaron contemplando un balance de cargas entre aniones y cationes.

Para los tratamientos de nutrición se aplicaron tres diferentes concentraciones de nutrientes en solución nutritiva, la cual se definió considerando los rangos utilizados para la producción hidropónica de hortalizas a nivel nacional e internacional. Los tres niveles de concentración de nutrientes, “bajo, medio y alto” en solución nutritiva, presentaron incrementos entre las soluciones en relaciones 1:2 y 1:3 tanto entre los elementos como a nivel general en la solución nutritiva (Cuadro 1).

Diseño Experimental

El diseño experimental desarrollado en esta investigación consistió en un arreglo factorial de tres niveles de nutrición y dos niveles de riego, con un arreglo irrestricto, distribuido de forma aleatoria en la parcela, con tres repeticiones por tratamiento (Figura 2).

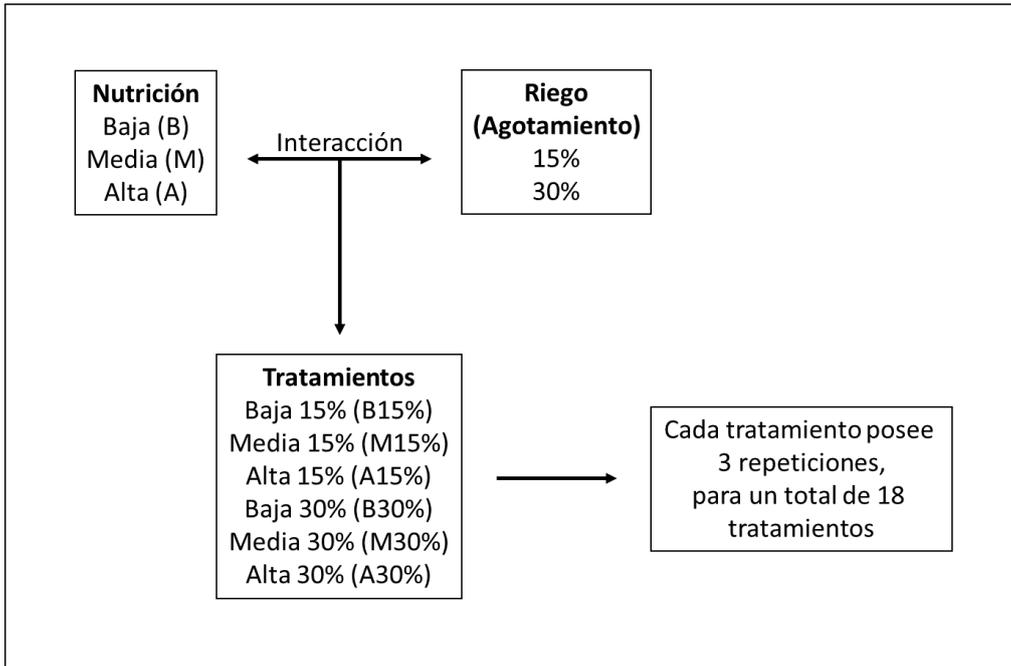


Figura 2. Esquema de los niveles de nutrición y riego y su formación de tratamientos aplicados en la investigación.

La zona de investigación se conformó por 12 hileras, con una distancia de 1,5 m entre hileras y con una distancia entre plantas de 0,33 m, para una densidad de siembra de 2 plantas m⁻². Las hileras se disponían de 34 pacas de fibra de coco, para un total de 408 pacas. En cada paca se colocaron 3 plantas, para un total de 1224 plantas. La parcela útil se estableció de 810 plantas y el borde de 414 plantas (Figura 3).

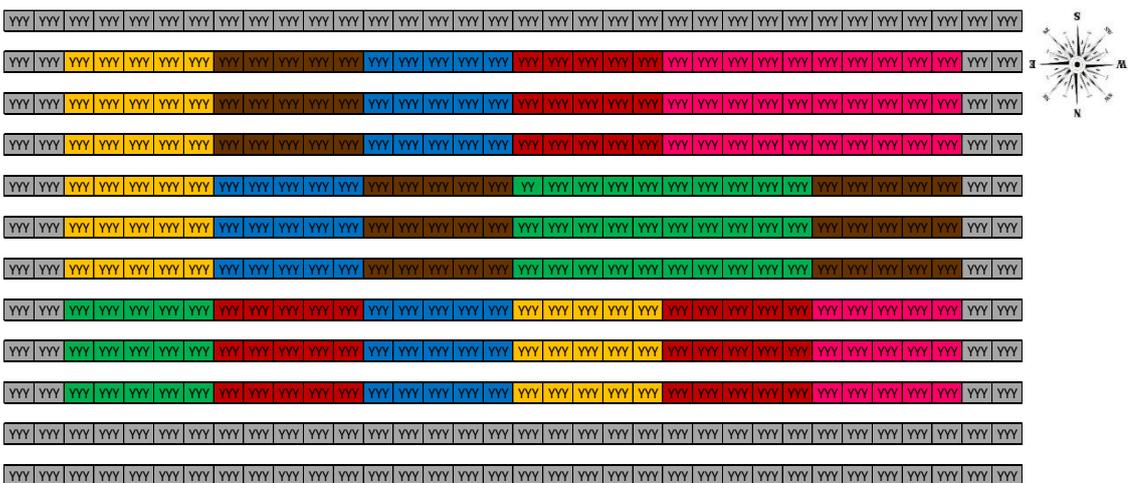


Figura 3. Distribución de los tratamientos, donde los colores indican el tratamiento: verde = Nutrición baja con 15% de agotamiento, amarillo = Nutrición media con 15% de agotamiento, rojo = Nutrición alta con

15% de agotamiento, azul = Nutrición media con 30% de agotamiento, café = Nutrición baja con 30% de agotamiento y rosado = Nutrición alta con 30% de agotamiento; el color gris con “Y” representa el borde.

Ubicación de la investigación

La presente investigación se llevó a cabo durante el período de junio a octubre de 2018, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la Universidad de Costa Rica, ubicada en el Distrito San José, Alajuela, Costa Rica (10°01'N y 84°16'W, con una altitud de 840 msnm). Esta zona de vida según Holdridge, corresponde a Bosque húmedo Premontano (bh-P), donde se presentan valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa, de 1940 mm, 22°C y 78%, respectivamente.



Figura 4. Fotografía satelital de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, el cuadro con contorno rojo demarca la ubicación en donde se desarrolló la investigación. Fuente: Google Earth, adaptación propia.

Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con cubierta de polietileno transparente (200 μm) y malla anti-insectos (43 mesh) en las paredes, formado por 4 módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo, alturas de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa.

Durante el período de investigación la temperatura a lo interno del invernadero alcanzó valores de 37,5 °C como máximo y hasta 16,4 °C mínimo. La humedad relativa fue de hasta 100 % máxima y hasta 28,9 % mínima. El promedio de DPV se desarrolló entre un rango de 0,25 a 2,14 kPa (Figura 5).

Además, según el tanque evaporímetro se alcanzó una evaporación de hasta $10,3 \text{ mm día}^{-1}$ máxima y $1,6 \text{ mm día}^{-1}$ como mínima. La radiación solar llegó hasta $70,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ como máxima y $12,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ como mínima (Figura 6).

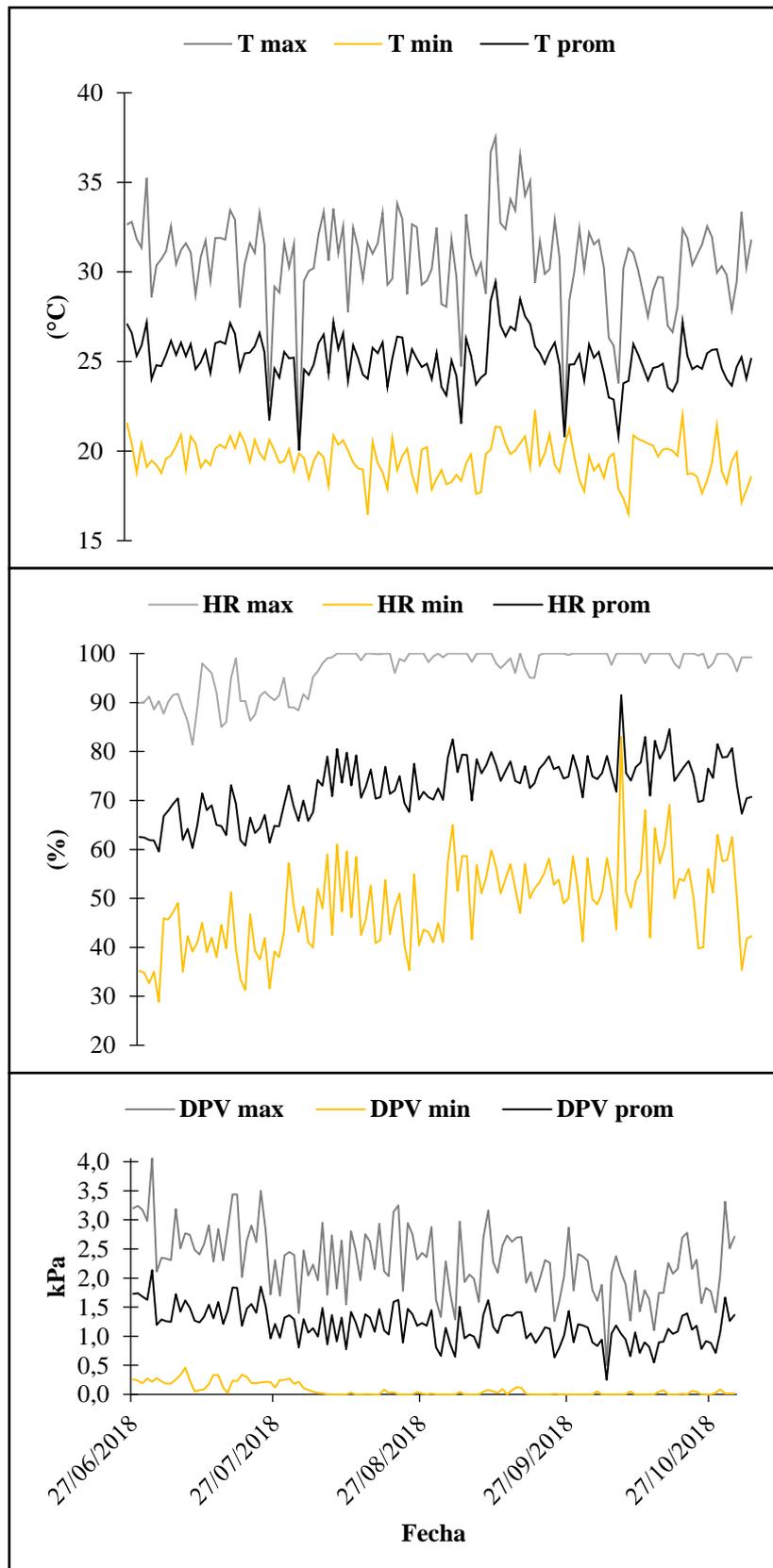


Figura 5. Comportamiento de las condiciones climáticas internas (temperatura = T, humedad relativa = HR y déficit de presión de vapor = DPV) en el ambiente protegido durante el período de la investigación.

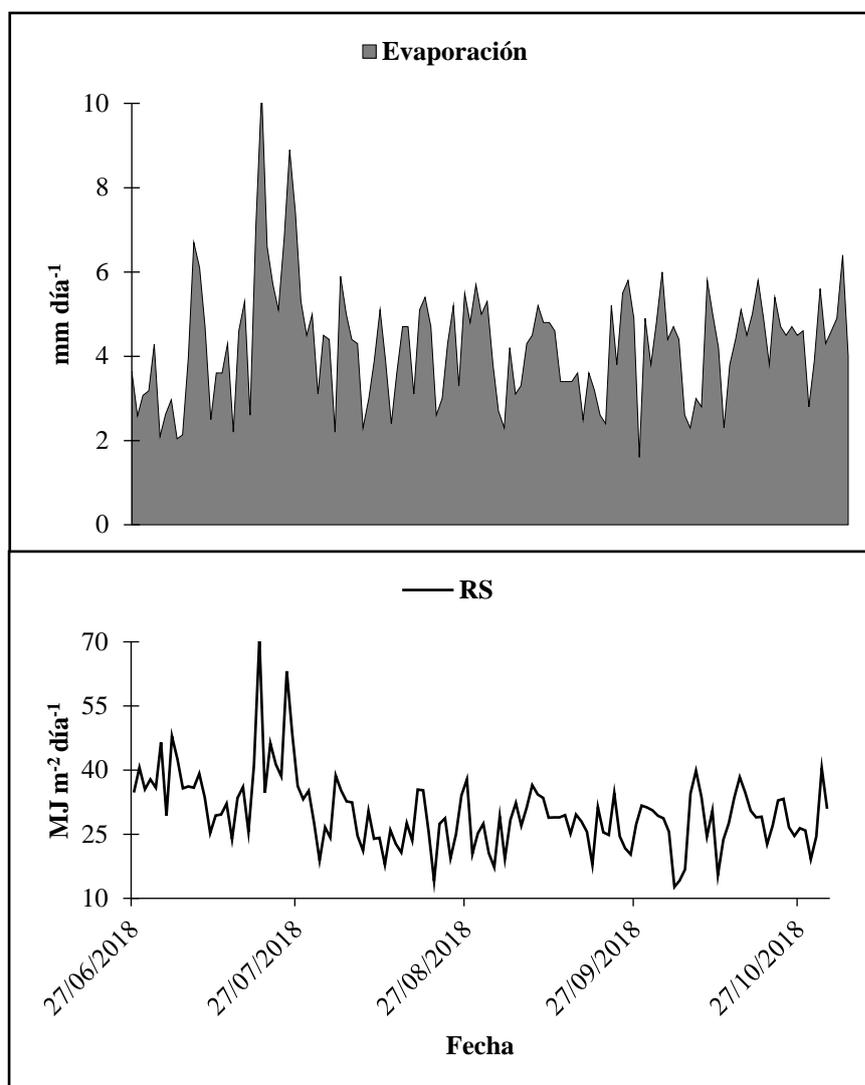


Figura 6. Comportamiento de las condiciones climáticas internas (evaporación y radiación solar global = RS) en el ambiente protegido durante el período de la investigación.

Material vegetal

Se utilizó el híbrido de tomate Gladiador, el cual presenta crecimiento determinado de larga vida multilocular, cuyas características genéticas son adaptadas para una mayor producción y resistencia a enfermedades. Posee características deseadas en rendimiento, larga vida poscosecha, adecuado

cierre pistilar, mantenimiento del calibre a través del tiempo y resistencia a *Verticilium* y *Fusarium* 1 – 2.



Figura 7. Fotografías del tomate variedad Gladiador utilizado en la investigación, donde A: planta recién trasplantada y B: Planta a los 56 días después de trasplante.

Manejo agronómico del cultivo

Se utilizó como sustrato fibra de coco en tablas de 3 kg en seco, con dimensiones de 16 cm de ancho x 3,5 cm de alto x 100 cm de largo y un volumen total de 28,8 L una vez hidratada. Las tablas fueron hidratadas aplicando riegos cortos cada 20 minutos hasta saturación. Posteriormente, se realizaron 2 cortes en forma de T invertida de aproximadamente 4 cm en la parte inferior del saco de cultivo y lo más próximos al suelo para drenar el exceso de agua aplicada. Los sacos de cultivo fueron colocados consecutivamente y formaron hileras simples espaciadas a 1,5 m de acuerdo a la distribución del cultivo.

Antes de iniciar con las evaluaciones, se determinaron las características físicas, químicas e hidráulicas del sustrato, según metodología de Ansorena (1994) para análisis de laboratorio de sustratos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis físico de la fibra de coco utilizada como sustrato en el cultivo bajo invernadero.

Parámetro	*Rango óptimo		Fibra de coco
	Máximo	Mínimo	

Índice de grosor (%)			65
Densidad aparente (g mL ⁻¹)	0,15	0,15	0,07
Densidad real (g mL ⁻¹)	1,0	1,0	0,65
Porosidad total (%)	-	>85	90
Fracción sólida (%)	15	15	10
Componentes totales	100	100	100
Humedad volumétrica (%)			
0 kPa (saturado)			90
1 kPa (capacidad de contenedor)	55	70	61
2,5 kPa			44
5 kPa	30	40	38
10 kPa (punto de marchitez)	25	30	32
Capacidad de aireación (%)			
0 kPa (saturado)			0
1 kPa (capacidad de contenedor)	30	15	29
2,5 kPa	15	15	46
5 kPa	55	45	52
10 kPa (punto de marchitez)	60	55	58
Tipos de agua (%)			
Agua fácilmente disponible	20	30	23
Agua de reserva	5	10	6
Agua total disponible	25	40	28
Agua difícilmente disponible	30	30	32

*Rangos óptimo para sustratos según Ansorena (1994).

La siembra se realizó por trasplante cuando las plántulas tenían 28 días de edad, con presencia de 4 a 5 hojas verdaderas. La distancia de siembra a utilizar fue de 33 cm, obteniendo una densidad de 2 plantas m⁻².

El manejo agronómico se llevó a cabo según las buenas prácticas agrícolas de la EEAFBM. El control fitosanitario se realizó con aplicaciones de protección al cultivo en donde se respetará los periodos a cosecha, además de emplear algunas prácticas etológicas y biológicas para el control de estas.

El sistema de riego por goteo que se utilizó fue superficial, donde se dispusieron tuberías de polietileno paralelas a las hileras de cultivo y provistas de goteros autocompensados y antidrenantes (2 L h^{-1}) con 4 goteros por paca de fibra de coco.

El sistema hidráulico constó de 3 bombas de $\frac{1}{2}$ HP, cada bomba manejó un tanque de solución nutritiva y los dos niveles de riego; se utilizó un software que activaba una señal que permitía que se encendiera tres tratamientos con el mismo nivel de riego y nutrición a la vez. La presión de operación se reguló con retrocesos en cada tratamiento.

El cultivo se manejó a una sola guía por planta, con deshijas y podas semanales cuidando mantener la dominancia apical; el tutorado se realizó con ganchos de descuelgue y prensas plásticas para sostener la guía (mecate).

Manejo de riego y nutrición

El sistema de riego contó con un sistema de automatización el cual se manejó mediante el método de lisímetro, donde se utilizaron sensores GS3 (TDR) capaces de medir CE, humedad volumétrica y temperatura. De esta manera, se programaron los riegos en función de la demanda del cultivo y según las condiciones climáticas. La información fue tomada en tiempo real y registrada en un datalogger (Campbell Scientific CR1000). Estos datos se transmitían por conexión inalámbrica a un servidor donde se almacenaban (Figura 8).

Se manejaron 18 electroválvulas, cada una independiente asignada a cada tratamiento que compartían el mismo reservorio y bomba; estas electroválvulas se activaron de acuerdo con la necesidad de cada tratamiento (Figura 8).

El sistema de riego se activó mediante los sensores TDR de acuerdo con la curva de retención de humedad y los parámetros de %HV establecidos. El sistema automático estuvo activo las 24 horas, por lo que en el momento en el que el contenido de agua en la fibra alcanzó el porcentaje de agotamiento establecido, se activaban las bombas que suministraban el agua y el nutriente requerido y se restablecía el punto de capacidad de contenedor.

Al alcanzarse el porcentaje de agotamiento establecido, mediante el algoritmo programado, se activaba el sistema de riego para reponer el volumen de agua requerido para alcanzar la capacidad de contenedor (CC). Una vez alcanzada la CC, el sistema generaba un riego adicional para garantizar que se cumpla el porcentaje de drenaje establecido. Con pluviómetros se determinó el porcentaje de drenaje, que resulta de la relación entre el volumen drenado y el volumen aplicado.

Con este sistema de automatización se buscó mantener la humedad del sustrato entre los porcentajes establecidos y capacidad de contenedor las 24 horas del día, por lo que se generó un sistema autónomo de decisión para la aplicación o recuperación de los niveles de humedad en el sustrato.

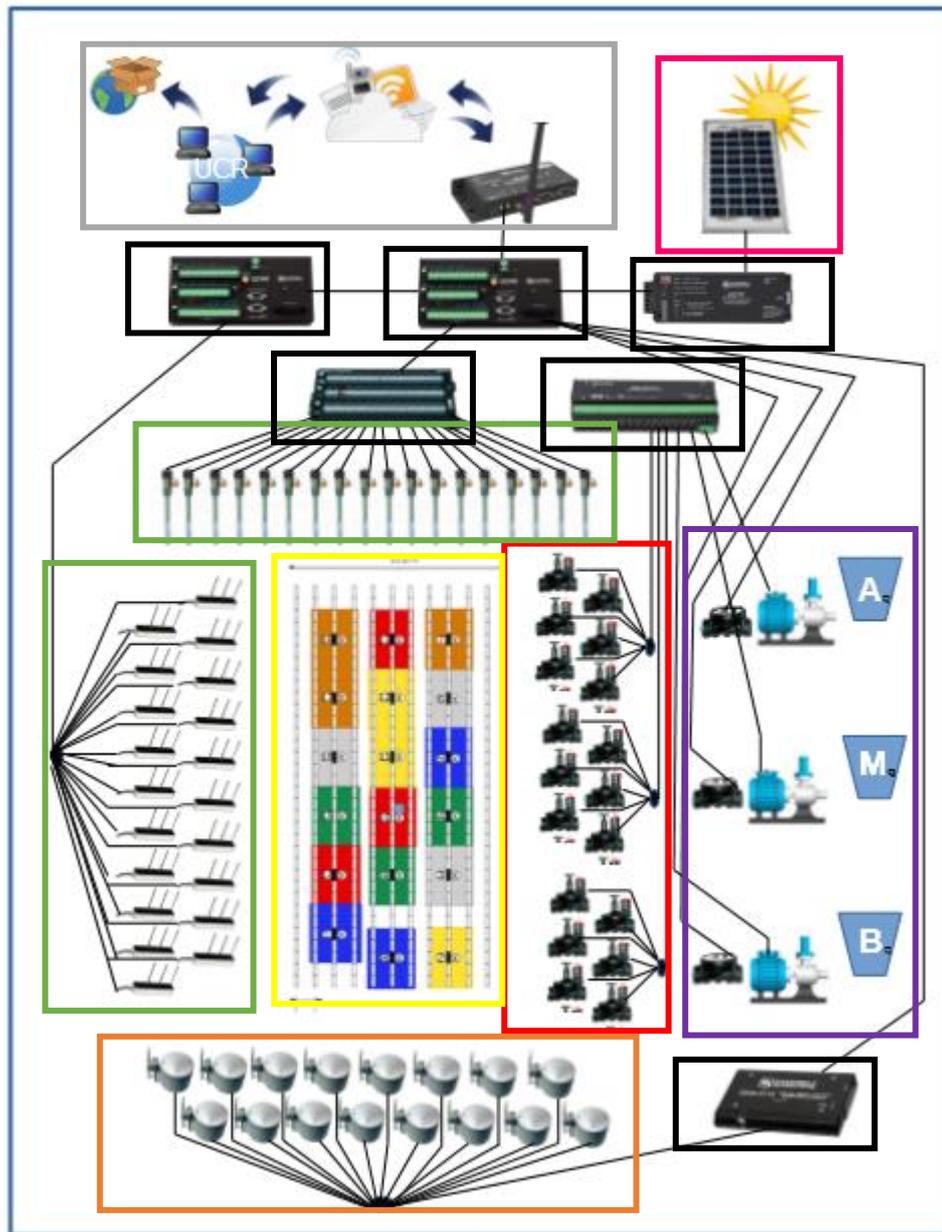


Figura 8. Esquema del sistema de automatización utilizado en el desarrollo de la investigación. Fuente: Julio Vega. Los cuadros indican: rojo = electroválvulas, morado = bombas eléctricas con sus respectivos tanques de solución nutritiva, verde = Sensores GS3 y tensiómetros, amarillo = tratamientos, negro = dataloggers, gris = modem y transferencia de información y rosado = celda fotovoltaica.

La nutrición se aplicó mediante riego por goteo (microtubos con estacas), utilizando tres soluciones nutritivas iónicamente equilibradas entre cationes y aniones (Cuadro 1). Se utilizaron fertilizantes como: nitrato de calcio, ácido nítrico, nitrato de potasio, fosfato monopotásico, sulfato de potasio, sulfato de

magnesio, cloruro de calcio (para la nutrición baja), EDTA-Fe, EDTA-Mn, EDTA-Cu, sulfato de zinc, ácido bórico y molibdeno al 4%.

El pH de las soluciones nutritivas se ajustó con ácido nítrico de acuerdo con la concentración de bicarbonatos presentes en el agua de riego [HCO_3^-]. Las concentraciones de nutrientes, el pH (7,20) y la CE ($0,13 \text{ mS cm}^{-1}$) del agua de riego se consideraron en el balance iónico de la solución nutritiva que se empleó en el experimento.

Cada una de las soluciones nutrición alta (NA), nutrición baja (NB) y nutrición media (NM) se prepararon a partir de tres soluciones concentradas 1:200 (solución A, B y C), considerando la compatibilidad y el límite de solubilidad de las sales fertilizantes. Las soluciones concentradas posteriormente se diluyeron en dos recipientes plásticos de 2500 litros cada uno, para la distribución según los tratamientos correspondientes a las soluciones NA, NB y NM.

Para preparar las soluciones diluidas a aplicar mediante fertirriego, el factor de dilución correspondió al factor de concentración usado en las soluciones concentradas A, B y C.

Variables de respuesta

En el presente estudio se evaluaron variables relacionadas con parámetros de manejo del riego, eficiencia de uso de agua (EUA) y eficiencia de uso de nutrientes (EUN).

En parámetros de manejo del riego se evaluó evapotranspiración de cultivo (ET_c), porcentaje de drenaje (%Dr), pH del drenaje y conductividad eléctrica (EC) del drenaje y del sustrato. La ET_c se determinó a partir del balance de agua en el sustrato (Soto et al. 2014), utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{ET}_c = R - D - (\text{Hvi} - \text{Hvf})$$

Donde, ($\text{Hvi} - \text{Hvf}$) es la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato (mm) al inicio (Hvi) y al final (Hvf) del periodo; R y D, son los volúmenes de riego y drenaje (mm) para dicho período, respectivamente.

En cada repetición se colocaron dos canaletas: una canaleta de demanda inteligente para las variables de ET_c, drenaje y activación de riegos y la otra canaleta para la recolección de drenajes en la cual se miden los parámetros de pH y CE del drenaje, además de la medición de la concentración de nutrientes presente en el drenaje.



Figura 9. Canaleta de demanda inteligente donde se miden las variables de riego. Fuente: Elaboración propia.

Durante el ciclo de vida del cultivo y para cada repetición, se midieron los volúmenes de cada riego aportado, el volumen de drenaje y sus respectivas concentraciones de nutrientes. Los volúmenes de riego se cuantificaron mediante un caudalímetro. Los volúmenes de drenaje se midieron mediante pluviómetros ECHO Rain (Mod. ECRN-100). Se recolectaron semanalmente submuestras de cada solución nutritiva y de los drenajes de cada repetición para determinar la conductividad eléctrica (CE) y el pH utilizando un pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod.HI98129). Todas las submuestras de solución nutritiva y drenaje se almacenaron a 0 °C aproximadamente, posterior a su recolección.

Se tomó una muestra de cada solución nutritiva aplicada en fertirriego desde goteros diferentes seleccionados al azar donde se determinó CE y pH. Cada 30 días aproximadamente, se determinó las concentraciones de nutrientes (mg L^{-1}) desde una muestra compuesta por varias submuestras. El volumen de drenaje diario se midió antes de iniciar el primer riego de cada día.



Figura 10. Instrumentos de medición A: pHmetro-conductímetro (HANNA Mod.HI98129) utilizado para las mediciones de pH y CE de solución nutritiva, drenajes y solución del sustrato y B: pluviómetros ECHO Rain (Mod. ECRN-100) para cuantificar los volúmenes de drenaje Fuente: Elaboración propia.



Figura 11. Muestras compuestas de drenajes, recién evaluados los parámetros de potencial de Hidrógeno y conductividad eléctrica a la espera de su almacenaje en refrigeración. Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje que drena, respecto de lo que se aplica se conoce como fracción de drenaje, la que corresponde a la fracción de lavado cuando tiene el propósito de evitar la salinización del sustrato. Se calcula de la siguiente forma:

$$\%Dr = \frac{\text{Drenaje}}{\text{volumen aplicado}} \times 100$$

Donde, drenaje corresponde al volumen drenado (L) medido con pluviómetro y volumen aplicado (L) medido por caudalímetro.

La eficiencia de uso de agua (EUA), se define como el cociente de la cantidad de kg en producción alcanzada entre el volumen de agua consumido por planta (ETc). Es decir:

$$EUA = \frac{\text{rendimiento (kg)}}{\text{volumen (m}^3\text{)}}$$

Donde, rendimiento corresponde al rendimiento comercial acumulado (kg) y volumen corresponde a la ETc acumulada (m³).

Para cuantificar el rendimiento, se tomaron 10 plantas por repetición para registrar las cosechas acumuladas. Se realizaron dos cosechas semanales a partir del cambio de coloración en la zona pistilar del fruto (Figura 12). La cosecha se realizó en recipientes plásticos de 5 L de capacidad, debidamente rotulados. Esta actividad se realizaba en horas de la mañana, entre las 7:00 y las 9:00. Una vez cosechado la totalidad de tratamientos se procedió a cuantificar el rendimiento, en donde se clasificó la cosecha en las categorías según la norma de calidad de Wal-Mart: primera (frutos con un peso mayor a 200 g), segunda (frutos con un peso entre 200 g y 120 g), tercera (frutos con un peso menor a 120 g) (Figura 13) y rechazo (frutos con presencia de alteraciones ocasionadas por efecto de los tratamientos) (Figura 14).



Figura 12. A: Cosecha de frutos de tomate, B: Recipientes plásticos utilizados durante las cosechas y C: Identificación de los recipientes de acuerdo con el tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

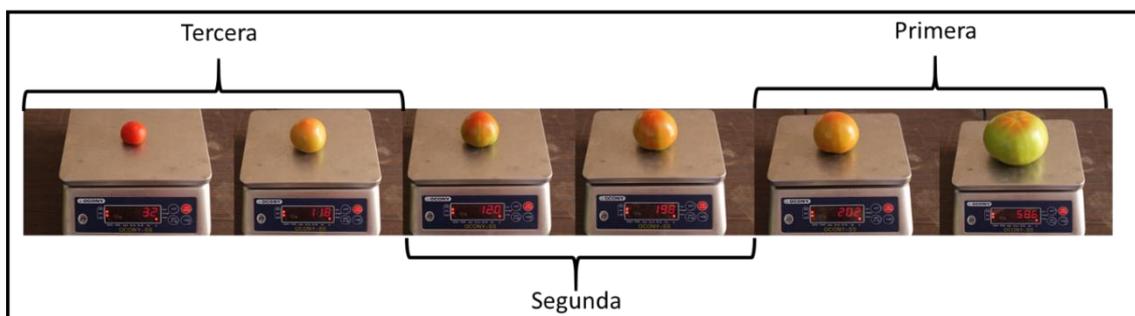


Figura 13. Clasificación del calibre de tomate según norma de calidad de Walmart.



Figura 14. Daño causado en frutos por influencia del tratamiento, A: frutos afectados por efectos de exceso de humedad “cracking” y B: frutos afectados por deficiencia de calcio “blossom-end rot”.

Para estimar la eficiencia de uso de nutrientes (EUN), se calcula como el cociente de los kg de nutriente absorbido por parte de la planta entre los kg de nutriente aplicado. Es decir:

$$EUN = \frac{\text{Nutriente absorbido (mg o kg)}}{\text{Nutriente aplicado (mg o kg)}}$$

Donde, nutriente absorbido se obtiene del producto de la materia seca final (MS) con la concentración de nutrientes foliar final y el nutriente aplicado se obtiene del producto de la concentración de la solución nutritiva con el volumen total aplicado.

Se tomaron los datos de materia seca para obtener por medio de análisis químico la cantidad de elemento presente en la planta. Una vez obtenido estos valores se utilizó la fórmula de volumen (V) x concentración (Cn) para obtener cantidad de nutriente absorbido

La extracción de nutrientes se elaboró a partir de cada una de las muestras de MS y su respectivo contenido de nutriente para N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, y Mn. La concentración de nutrientes se obtuvo a partir de una muestra compuesta de las tres repeticiones de los muestreos de MS, donde el contenido de nutriente se estimó mediante la MS de cada tratamiento previamente cuantificada.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos que cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad fueron sometidos a un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar si hubo efecto de la interacción entre los factores de nutrición y agotamiento (riego), o efectos independientes de ambos factores. Para esto se usó el software estadístico InfoStat versión 2018 de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Cuando se presentó interacción ($p < 0,05$), se realizó un análisis en dirección y magnitud de los efectos simples de ambos factores, mientras que cuando no hubo efecto de la interacción ($p > 0,05$), se analizó el efecto principal del factor o de ambos factores, que fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$).

Para el ANDEVA se utilizó el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \gamma_{ijk} + (\tau\gamma)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde, Y_{ijk} = representa la observación en el k-ésimo nivel del factor aplicado a la subparcela, de la i-ésima parcela principal en el j-ésimo bloque, μ = media general, τ_i = el efecto del i-ésimo nivel del factor aplicado a la parcela principal, β_j = el j-ésimo bloque, $(\tau\beta)_{ij}$ = el error experimental de las parcelas principales que se simboliza como la interacción entre el factor principal y los bloques, γ_{ijk} = el efecto del k-ésimo nivel del factor asociado a la subparcela dentro de la i-ésima parcela principal del j-ésimo bloque, $(\tau\gamma)_{ik}$ = la interacción del factor principal con el factor aplicado a las subparcelas y ε_{ijk} = el error experimental a nivel de subparcelas.

Resultados y discusión

De todas las variables evaluadas, únicamente hubo interacción para el porcentaje de drenaje ($p < 0,05$) (Cuadro 3).

Para las variables de respuesta ETc, CE drenaje, CE sustrato, EUA segunda, EUA tercera, EUA total, EUN N, EUN K, EUN Ca, EUN Mg, EUN S, EUN Fe y EUN Mn, se observaron tendencias diferentes ($p < 0,05$) de forma independiente según el nivel de nutrición. La variable EUN Zn presentó efecto independiente, en el factor nutrición y en la interacción ($p < 0,05$) pero con mayor magnitud en el efecto de nutrición (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen de los efectos principales e interacción de los factores de nutrición y riego, según el análisis de varianza.

		Variable de respuesta					
Efecto	Factor	ETc (L planta ⁻¹)	EC drenaje (mS cm ⁻¹)	pH drenaje	EC sustrato (mS cm ⁻¹)	Drenaje (%)	EUA primera (kg m ⁻³)
Principales	Nutrición	*	*		*		
	Riego					*	
Interacción	N x R					**	

		Variable de respuesta					
Efecto	Factor	EUA segunda (kg m ⁻³)	EUA tercera (kg m ⁻³)	EUA total (kg m ⁻³)	EUN N (kg kg ⁻¹)	EUN P (kg kg ⁻¹)	EUN K (kg kg ⁻¹)
Principales	Nutrición	*	*	*	*		*
	Riego						
Interacción	N x R						

		Variable de respuesta					
Efecto	Factor	EUN Ca (kg kg ⁻¹)	EUN Mg (kg kg ⁻¹)	EUN S (kg kg ⁻¹)	EUN Fe (kg kg ⁻¹)	EUN Zn (kg kg ⁻¹)	EUN Mn (kg kg ⁻¹)
Principales	Nutrición	*	*	*	*	*	*
	Riego						
Interacción	N x R					**	

* indica efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$), ** indica el factor de interacción estadísticamente significativo ($p < 0,05$).

Capítulo I. Parámetros de riego.

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

Durante la semana 3 y hasta la semana 9 se presentaron inconvenientes en el sistema para establecer y homogenizar las variables utilizadas para calcular

ETc. A partir de la semana 10, se logró estandarizar esta variable y a pesar de tener dos niveles de agotamiento que generan dos volúmenes de riego diferente, la tendencia o comportamiento de la ETc parece ser constante y con pequeñas diferencias entre los tratamientos (Figura 15).

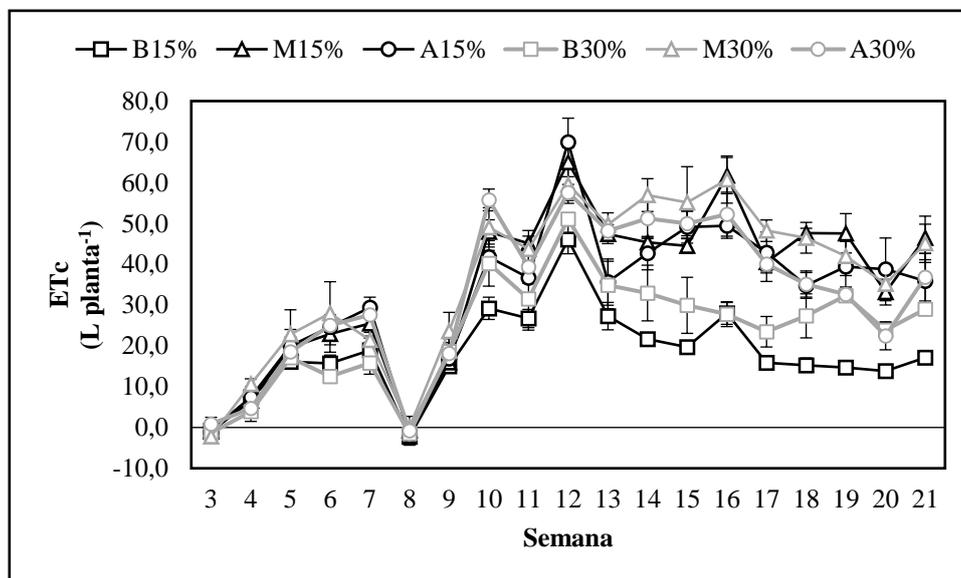


Figura 15. Evapotranspiración del cultivo (ETc) en L planta⁻¹ durante el experimento. Las barras indican el error estándar.

La ETc planta⁻¹, no fue afectada por el factor riego ni por la interacción nutrición-riego ($P > 0,05$), únicamente hubo efecto estadísticamente significativo ($P < 0,05$) debido al factor nutrición (Cuadro 3).

Al analizar la ETc indistintamente del nivel de agotamiento de la humedad, se observó que el mayor consumo de agua se presentó en el cultivo con un nivel medio de nutrición. El cambio de nivel de nutrición implicó incrementos de 57% al pasar de un cultivo con nutrición alta a otro con nutrición baja, de 71% al variar de nutrición media a nutrición baja y un 11% a cambiar de nutrición media a nutrición alta (Figura 16).

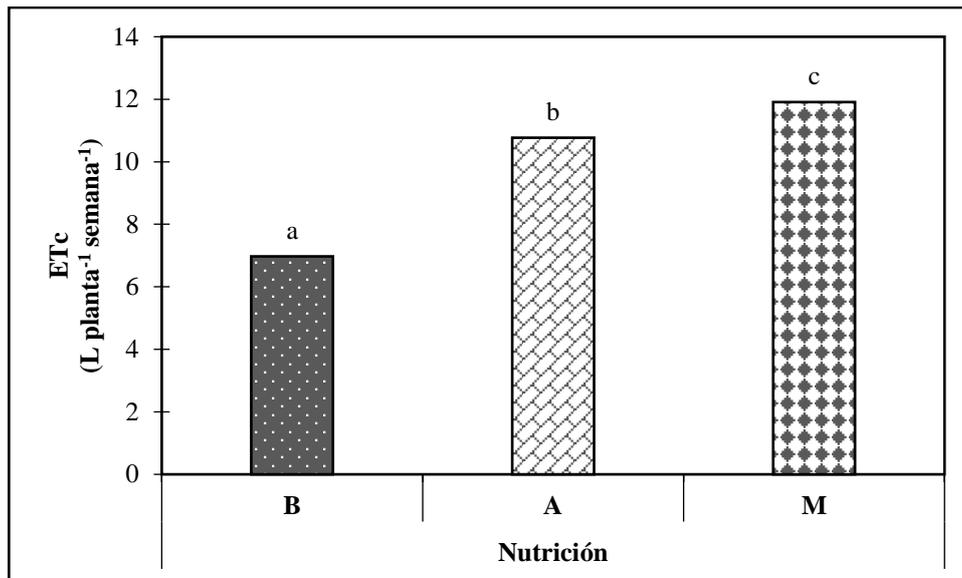


Figura 16. Evapotranspiración del cultivo ($L\ planta^{-1}\ semana^{-1}$) en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

Al comparar los datos de Soto (2018), el tratamiento en el que se aplicó riego cada hora mediante un balance de agua diario obtuvo valores de 13,3 a 16,1 $L\ planta^{-1}\ semana^{-1}$. Estos datos se obtuvieron en una época similar (período lluvioso) a la de esta investigación, en la misma ubicación, pero en tomate cherry.

Para esta investigación se alcanzaron datos de ETc de 6,97 $L\ planta^{-1}\ semana^{-1}$ en los tratamientos con una nutrición baja, mientras que en el caso de los tratamientos con nutrición alta se alcanzó 11,91 $L\ planta^{-1}\ semana^{-1}$.

Esta comparación sugiere que los valores de ETc semanales están dentro del rango reportado por Soto (2018), lo cual muestra, además, que se logró una disminución desde un 10% hasta un 47% en el consumo de agua por parte de la planta.

Conductividad eléctrica (CE)

Esta variable fue medible a nivel de sustrato y drenaje. En todos los tratamientos, la conductividad eléctrica (CE), inició con valores diferentes entre los tratamientos debido al factor nutricional de las soluciones nutritivas (Anexo,

cuadro 24). Sin embargo, la CE del drenaje y del sustrato se comportaron en función de su incremento nutricional, es decir, conforme la solución nutritiva aumenta los valores de CE en los medios donde se evaluó incrementa (Cuadro 4).

Para los tratamientos donde se maneja una nutrición alta, se observó una mayor CE tanto en el sustrato como en los drenajes debido a la acumulación de sales que se formaron. A pesar de poseer diferentes agotamientos, en donde se generaron volúmenes de agua diferente no existe diferencias en cuanto al riego que se aplicó como a la interacción de los tratamientos, este comportamiento se debió solo a efecto de la nutrición.

Por lo tanto, al tener una mayor cantidad de fuentes de fertilizantes en una solución nutritiva, esto implicó un incremento de CE en los depósitos finales, en este caso sustrato y drenajes. Se observaron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre factores; a nivel de sustrato se manejó una CE de $8,42 \text{ mS cm}^{-1}$ y en el drenaje de $2,84 \text{ mS cm}^{-1}$, ambos en condiciones de nutrición con aporte alto de elementos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Conductividad eléctrica (mS cm^{-1}) en el drenaje y sustrato en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($P < 0,05$).

Nutrición	Baja	Media	Alta
Drenaje	0,24 a	1,18 b	2,84 c
Sustrato	1,71 a	5,85 b	8,42 c

Al comparar los valores promedio de CE de la solución nutritiva en el gotero (Anexo, Cuadro 23) respecto a los valores de CE obtenidos en drenaje (Cuadro 4), se observaron diferencias de alrededor de $0,5 \text{ mS cm}^{-1}$, lo cual según Magán et al. (2008), a nivel práctico de manejo del cultivo, se considera aceptable. No obstante, existieron diferencias muy inferiores a $0,5 \text{ mS cm}^{-1}$ (nutrición alta) lo cual no es adecuado debido a que se está perdiendo en su mayoría la cantidad de nutrientes que se aportaron, es decir, gran parte de los

nutrientes aplicados están siendo evacuados por el drenaje debido a que la planta no logra absorber la mayoría de los elementos.

En un sustrato, una CE más alta que la CE aplicada por el sistema de riego (solución nutritiva), deberá ajustarse para evitar problemas de pérdida de sistema radicular por CE alta (Abad et al. 1993). Rosa et al. (2001) mencionan que la CE no es un factor de riesgo si se emplea un programa de lavado y riego adecuado para la eliminación del exceso de las sales solubles.

Los resultados de CE en el sustrato (Cuadro 4) se deben probablemente a que la planta absorbe proporcionalmente mayor cantidad de agua que de nutrimentos; tomando en cuenta la cantidad de agua que se pierde por evaporación, la solución drenada tendrá una concentración de soluto (nutrientes) mayor que de agua (solvente), aumentando de esta manera la conductividad eléctrica.

En el caso de los tratamientos con nutrición alta, se da un efecto acumulativo de sales en sustrato que no fueron negativas para el cultivo ya que se obtuvieron rendimientos aceptables. Según Lara (1999) y Chang et al. (2012), la CE en el sustrato mayor a 6 mS m^{-1} se generan pérdidas de hasta un 25% en rendimiento, mientras que una CE menor que 2 mS m^{-1} , no se dan pérdidas.

Al comparar con los datos anteriores, el rendimiento no fue afectado por la CE ya que, en la nutrición alta se alcanzaron buenos rendimientos (Figura 20), esto se podría ver influido por el riego, ya que el sistema a pesar de generarse acumulamiento de sales existió de cierta manera una circulación de agua.

Por lo tanto, los resultados obtenidos se deben probablemente a que la planta absorbe en mayor proporción agua que nutrimentos. La solución drenada tendrá una concentración de nutrientes mayor que de la solución nutritiva, aumentando de esta manera la conductividad eléctrica.

Potencial de hidrógeno (pH)

Esta variable fue cuantificada a nivel drenaje. En todos los tratamientos, el pH se inició con valores diferentes entre los tratamientos debido al factor nutricional de las soluciones nutritivas (Anexos, Cuadro 23). Sin embargo, el pH no es una variable que presente diferencias en los tratamientos, ni por un efecto

nutricional, es decir, puede cambiar de un momento a otro, pero no presenta variaciones que consideren ser diferentes ($p > 0,05$).

La tendencia es que el pH en el drenaje es mayor, ya que al sacar por lavado nutrientes residuales, estos generan un efecto de basicidad en el agua (Arévalo 2015).

A pesar de esto, es una variable que, sí presenta importancia en la solución nutritiva, debido al rango de absorción de elementos. Debe mantenerse en un rango óptimo que garantice la disponibilidad de los elementos presentes en dicha solución. El pH en una solución nutritiva determina la solubilidad de algunos nutrimentos, principalmente de P y Ca^{2+} , para evitar su precipitación, el pH debe ser mantenido entre 5,5 y 6,0 (Lara 1999; Aguayo et al., 2004).

No se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos, en los valores promedio de pH en drenaje durante el ciclo de cultivo. En el drenaje los valores promedio globales fueron similares (entre 6-7) en todos los tratamientos (Anexos, Figura). Según de la Rosa et al. (2018), reportaron valores de pH en el drenaje entre 6,3 y 6,8; lo cual coincide con los valores reportados en esta investigación.

Porcentaje de drenaje (%Dr)

Para todos los tratamientos, el porcentaje de drenaje tuvo un comportamiento atípico. Durante el inicio de la investigación se presentaron algunos inconvenientes en la programación del porcentaje de drenaje, no obstante, en la semana 9 se logró la configuración del sistema para que se cumpliera el 15% de drenaje que se estableció inicialmente.

Se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la interacción nutrición-riego y en el factor riego, en los valores promedio del porcentaje de drenaje durante el ciclo de cultivo. En el factor de riego se observaron valores que van de 5,6% hasta 7,9% en los agotamientos al 30% y 15%, respectivamente. Mientras que en la interacción nutrición-riego los valores promedios van de 4,89% en el tratamiento A30% hasta 10,15% en el tratamiento M15% (Figura 19).

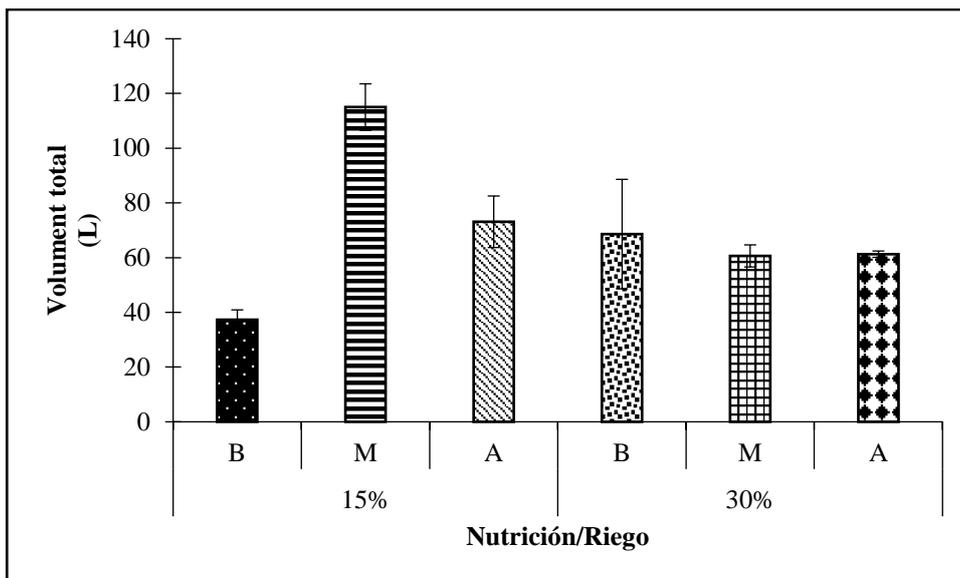


Figura 17. Volumen total drenado (L) para cada tratamiento durante el período de investigación. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% = nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Las barras indican el error estándar.

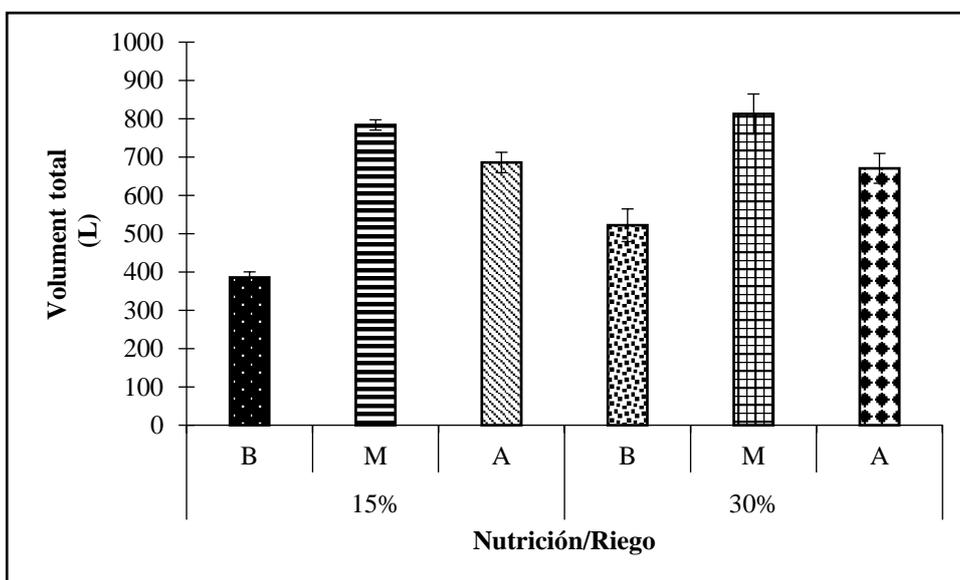


Figura 18. Volumen total de riego aplicado (L) para cada tratamiento durante el período de investigación. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% =

nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Las barras indican el error estándar.

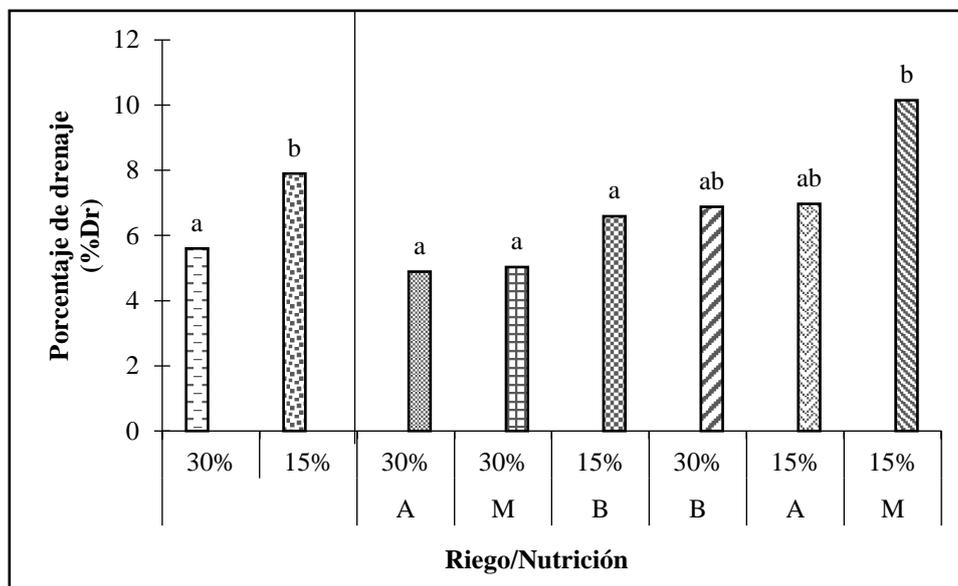


Figura 19. Porcentaje de drenaje (% Dr) en los diferentes tratamientos. Donde B15% = nutrición baja con 15% de agotamiento, A15% = nutrición alta con 15% de agotamiento, M15% = nutrición media con 15% de agotamiento, B30% = nutrición baja con 30% de agotamiento, A30% = nutrición alta con 30% de agotamiento y M = nutrición media con 30% de agotamiento. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

En general, los valores de drenaje obtenidos en los diferentes tratamientos se consideran normales para el manejo de riego en cultivos sin suelo en condiciones con aguas de regular calidad (Magán et al. 2008), lo cual sugiere que el manejo del riego para los tratamientos estuvo dentro de los rangos normales de manejo convencional utilizado en cultivos comerciales.

Capítulo II. Eficiencia de uso de agua (EUA)

Para esta variable se observan diferencias significativas ($p < 0,05$) en el factor nutrición solamente tanto para EUA comercial total, como para EUA de

segunda y tercera calidad. La EUA de primera calidad no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$).

En las tres variables, el factor de nutrición baja presenta la mayor eficiencia de uso de agua, en donde se observan valores de $10,06 \text{ kg m}^{-3}$ para los rendimientos de segunda (Figura 22 a) y $9,04 \text{ kg m}^{-3}$ para los rendimientos de tercera calidad (Figura 22 b). La EUA comercial total es de $31,31 \text{ kg m}^{-3}$ para el factor de nutrición baja mientras que $26,50 \text{ kg m}^{-3}$ son de la nutrición media (Figura 23).

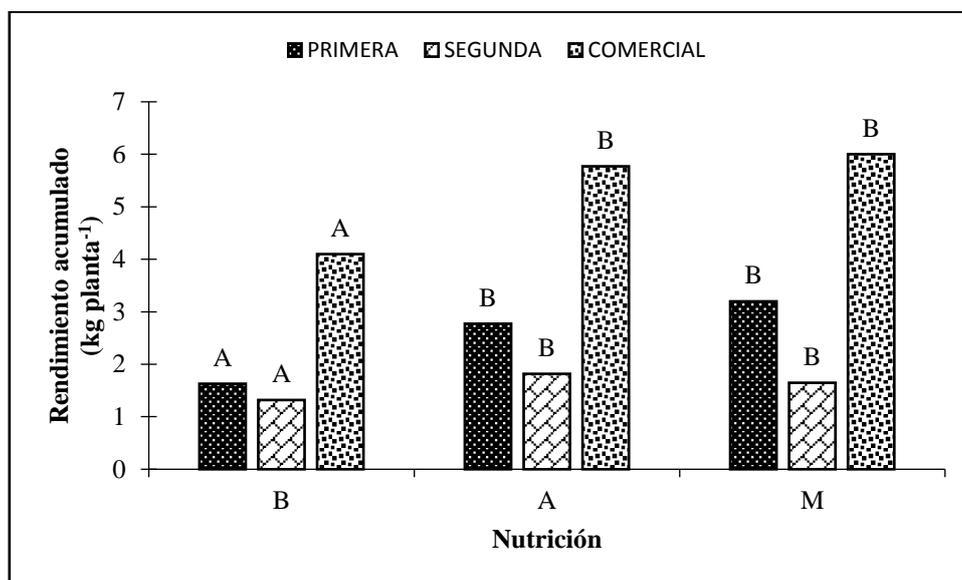


Figura 20. Rendimiento acumulado (kg planta^{-1}) obtenidos de cada tratamiento. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

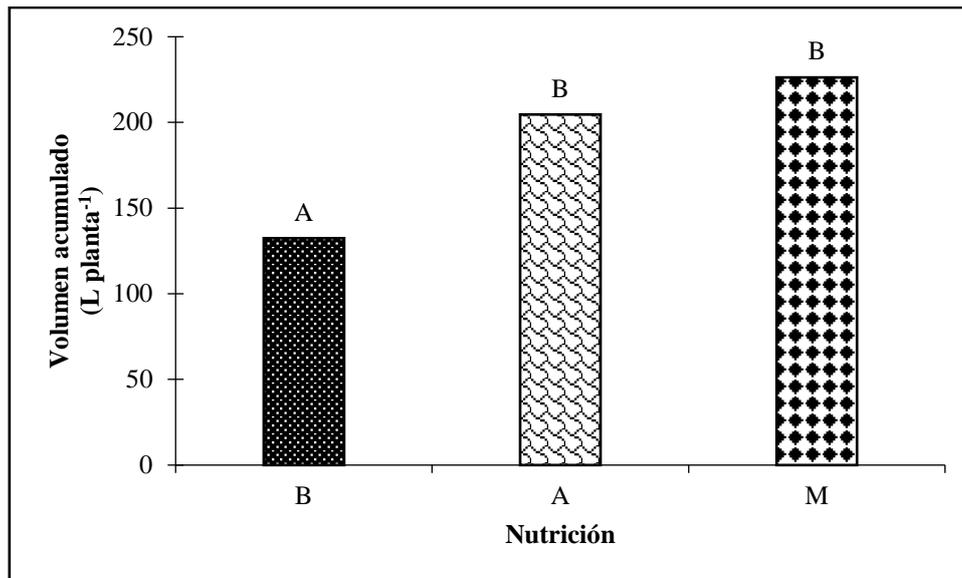


Figura 21. Volumen de riego acumulado (L planta⁻¹) obtenido de cada tratamiento. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

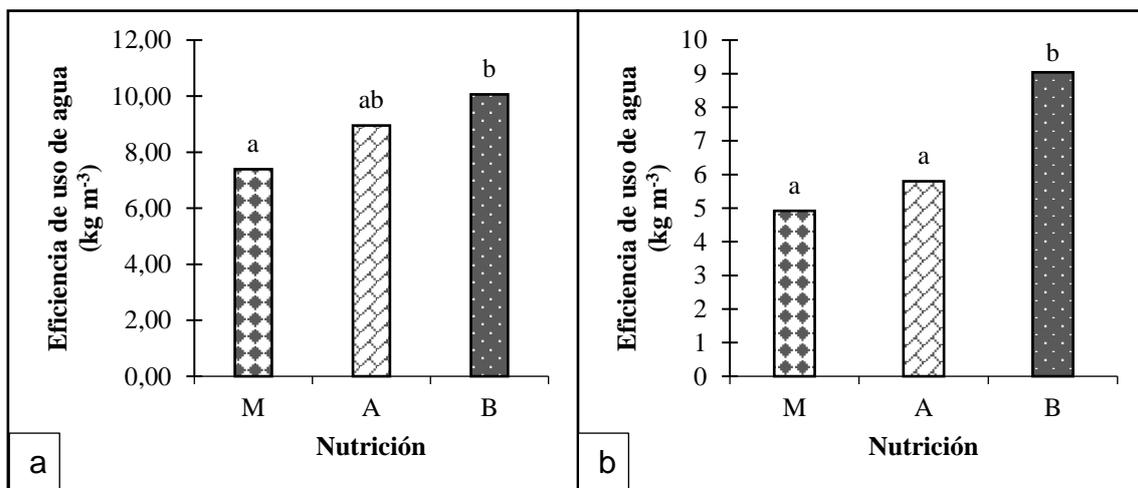


Figura 22. Eficiencia de uso de agua (EUA) según calibres de frutos, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

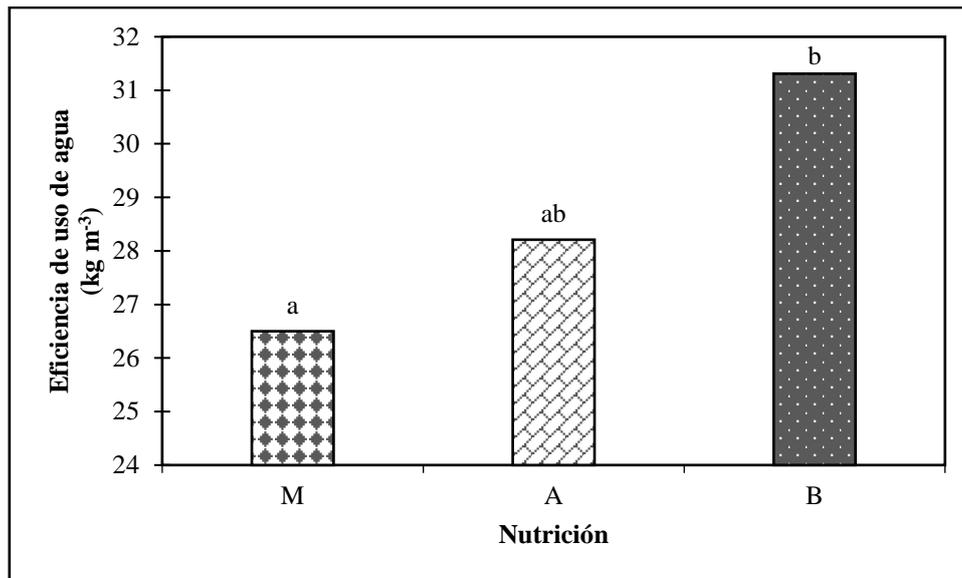


Figura 23. Eficiencia de uso de agua (EUA) según el rendimiento comercial total, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

De acuerdo con Flores et al. (2007), México alcanzó una EUA de 35 kg m^{-3} a una densidad de $4,3 \text{ plantas m}^{-2}$ en condiciones de invernadero, mientras en Holanda según Salazar et al. (2014), se alcanzan hasta 45 kg m^{-3} en invernadero, pero con condiciones de calefacción e inyección de CO_2 . A pesar de no alcanzar la misma EUA que en México, se mantiene una eficiencia aceptable; se debe considerar que en México se usó una densidad de siembra de $4,3 \text{ plantas m}^{-2}$ mientras que en esta investigación se utilizó una densidad de 2 plantas m^{-2} .

A pesar de que los factores nutricionales altos y medios mostraron un mayor rendimiento (Figura 20), presentaron también una mayor ETc (Figura 16), lo cual generó una eficiencia baja. Caso contrario sucedió con el factor nutricional bajo, el cual presentó un rendimiento inferior a los demás ($4,1 \text{ kg planta}^{-1}$ en promedio) y una ETc acumulada de $132,51 \text{ L planta}^{-1}$). En cuanto a rendimiento, los tratamientos de nutrición alta y media presentaron el mayor rendimiento por planta, con 6 y $5,77 \text{ kg planta}^{-1}$ respectivamente.

Una planta con mejor nutrición contribuye en la mejora de ciertos aspectos, entre ellos el calibre. Los tratamientos con nutrición alta y media lograron concentrar una mayor cantidad de frutos de primera (Figura 20). Por lo

que, la planta requerirá una producción más alta de follaje para destinar una mayor cantidad de recursos en la formación de frutos. Esto implica un aumento en absorción de agua principalmente y nutrientes, por lo que se genera un detrimento en la EUA.

Capítulo III. Eficiencia de uso de nutrientes (EUN)

En el caso de los elementos mayores analizados, solo el fósforo no presenta diferencias significativas ($p>0,05$). Por otra parte, N, K, Ca, Mg y S sí presentan diferencias significativas en la variable nutrición, donde en todos los casos predomina el factor B con EUN de 0,23; 0,20; 0,17; 0,16 y 0,14 kg kg^{-1} respectivamente (Figuras 24, 25, 26, 27 y 28)

Para los elementos menores, el Fe en el caso de la nutrición media y baja se comportaron igual con EUN de 0,50 y 0,65 mg mg^{-1} respectivamente (Figura 29). En el caso del elemento Zinc, este mostró diferencias significativas en la interacción ($p<0,05$) alcanzando una EUN de 0,25 mg mg^{-1} en el tratamiento M15% (Figura 30). El elemento Mn también presenta diferencias significativas ($p<0,05$) con una mayor eficiencia en el factor nutrición con 0,17 mg mg^{-1} en la nutrición baja (Figura 31).

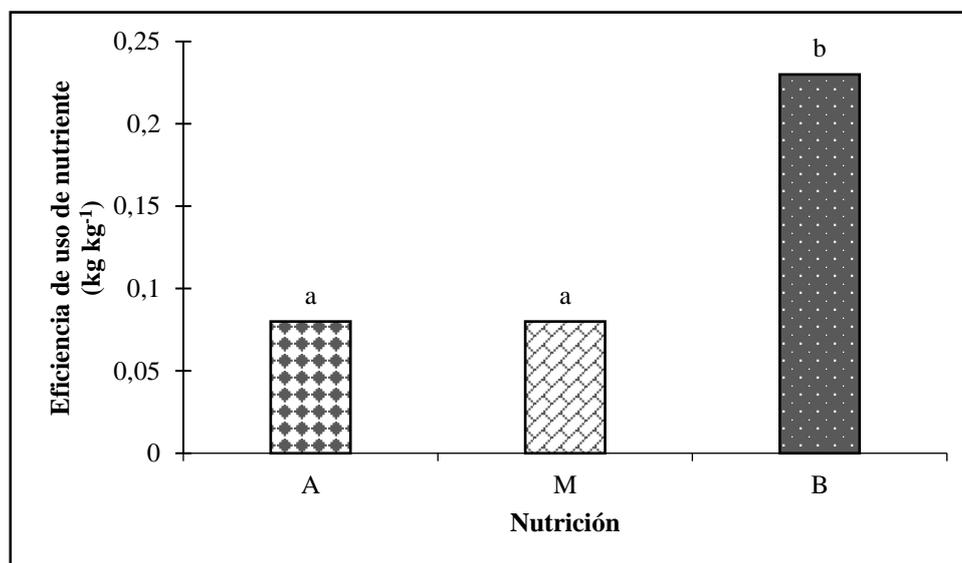


Figura 24. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Nitrógeno, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición

media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

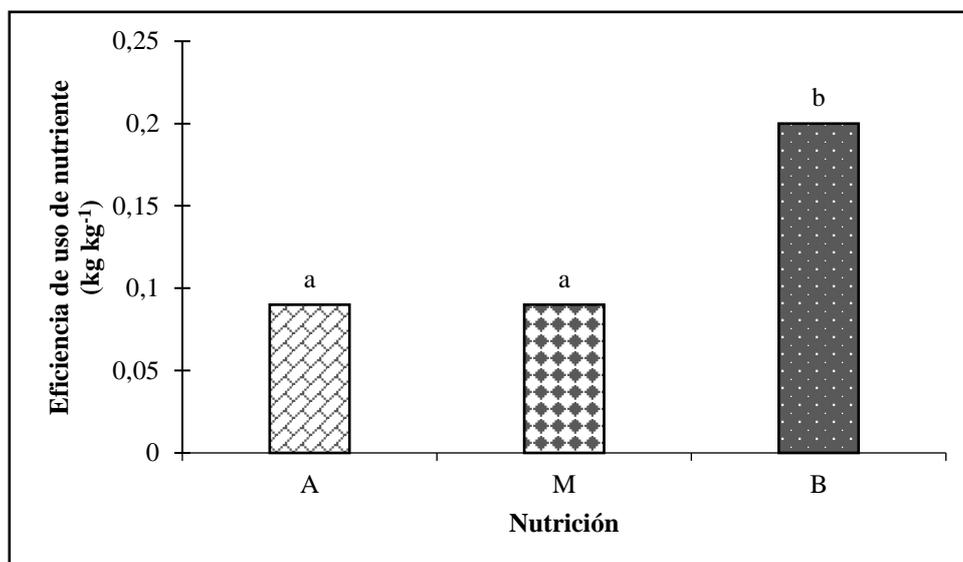


Figura 25. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Potasio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

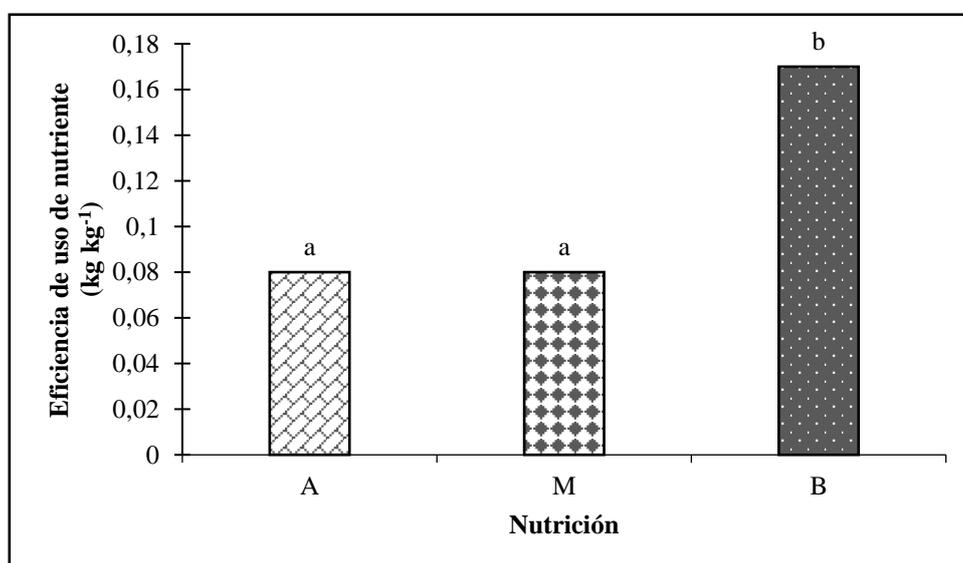


Figura 26. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Calcio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

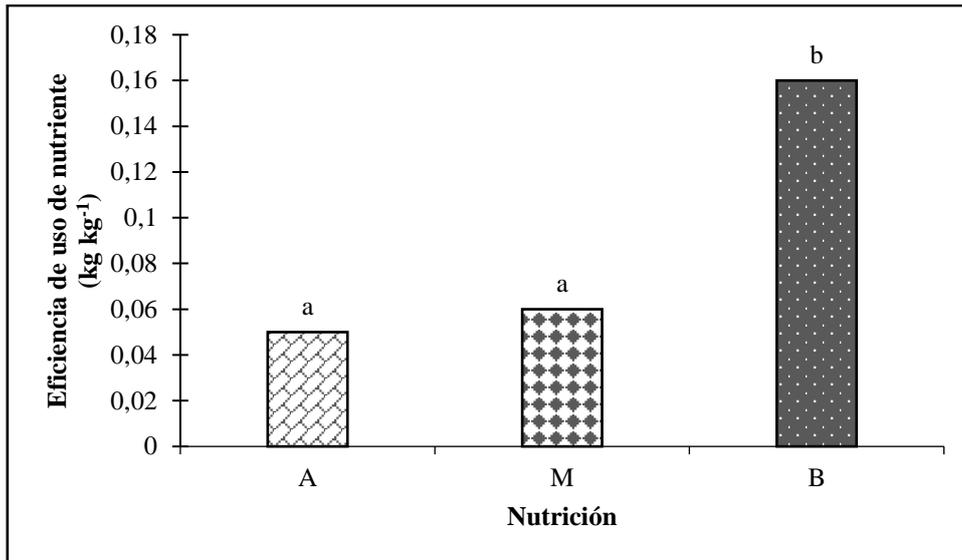


Figura 27. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Magnesio, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

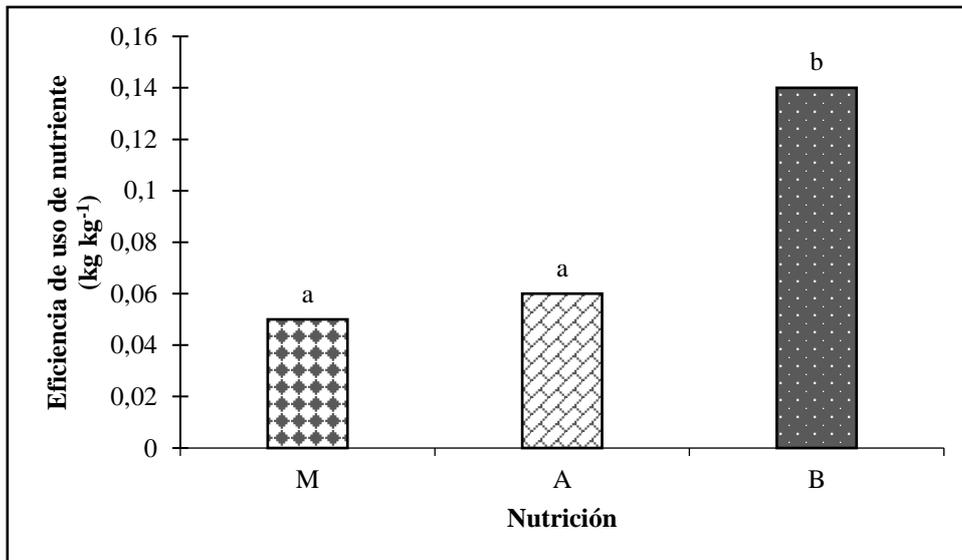


Figura 28. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para Azufre, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

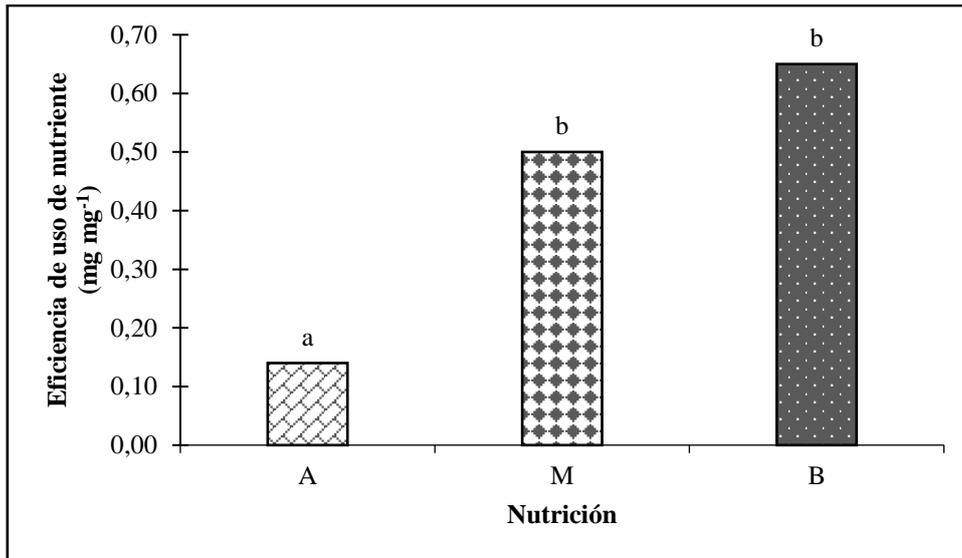


Figura 29. Eficiencias de uso de nutriente (EUN) para el elemento Hierro, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

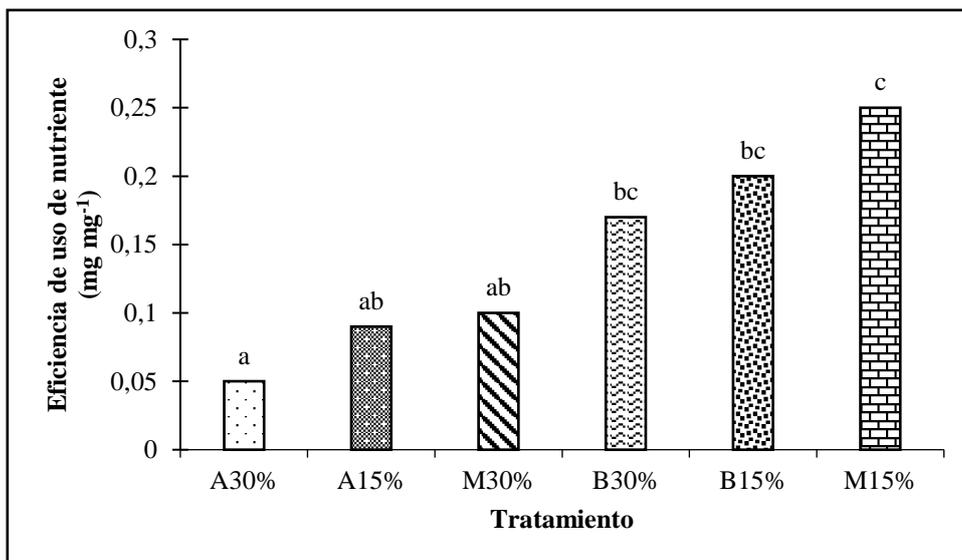


Figura 30. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para el elemento Zinc, en las diferentes nutriciones y riegos. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta, M = nutrición media, 15% = agotamiento de 15% y 30% = agotamiento de 30%. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

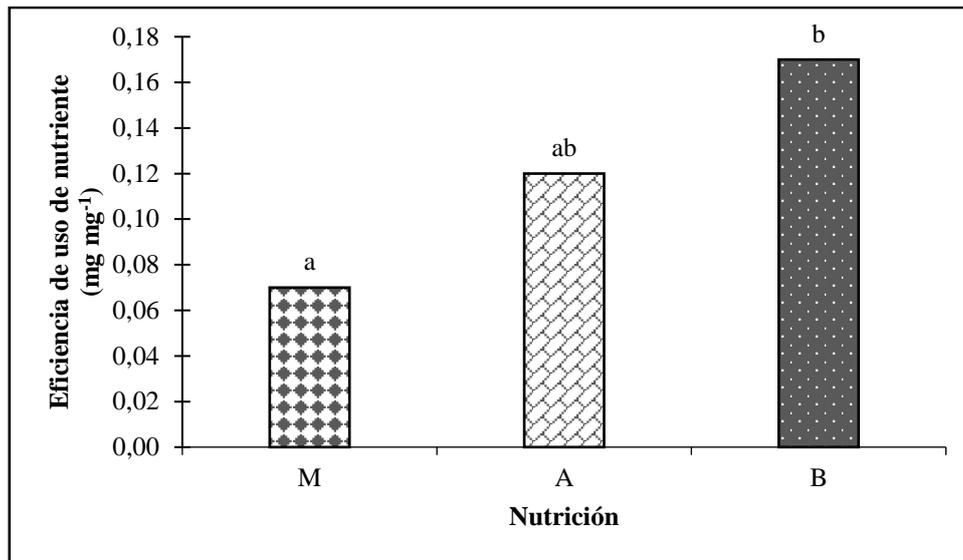


Figura 31. Eficiencia de uso de nutriente (EUN) para el elemento Manganese, en las diferentes nutriciones. Donde B = nutrición baja, A = nutrición alta y M = nutrición media. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

De acuerdo con Dobermann (2007) e Isherwood (1990), se presentan eficiencias de uso de nutrientes por debajo de los niveles sugeridos. Esto quiere decir, que la planta no logra recuperar en mayor proporción el o los elementos aplicados. En este caso, el factor de nutrición baja se esperaría que tenga una mejor eficiencia, debido a que por su condición nutricional más limitada tuvo que aprovechar de mejor forma los recursos que se le brinden.

En una EUN (recuperación) se esperaría alcanzar valores cercanos a 100, lo cual indicaría que el cultivo fue capaz de utilizar la totalidad del fertilizante aplicado. No obstante, en cereales, Dobermann (2007) menciona que un parámetro óptimo sería obtener eficiencias entre 0,3 y 0,5 kg kg⁻¹. En el caso del elemento Fe, se observó que, sí cumple con el parámetro anterior, por otra parte, elementos como N, K y Zn sus valores están cercanos a de 0,3 kg kg⁻¹.

En el caso de las nutriciones media y alta, la no recuperación eficiente de nutrientes puede verse ligada en la pérdida de elementos presentes vía CE. Al tener una CE más alta implica una mayor concentración de nutrientes que en este caso gran parte ha sido pérdida por retención en el sustrato y drenaje (Cuadro 4).

La cinética de absorción de nutrientes en una planta está influenciada por la capacidad de un suelo en mantener la solubilidad de los elementos en cierto rango de concentraciones. Los suelos tienen una capacidad buffer que está determinada por características químicas, físicas y biológicas que presente, por lo que esto contribuye a mantener en un estado de almacenamiento o disponibilidad de elementos según la capacidad de absorción de la planta (Cometti et al. 2006).

La capacidad de aportar nutrientes de un sustrato depende de la cantidad de elementos nutritivos que éste posea y de la capacidad de intercambio catiónico. En sustratos orgánicos la cantidad de nutrientes asimilables es pequeña, por lo que su capacidad buffer es menor comparada a un suelo, además es muy sensible a cambios bruscos del pH y CE (Bracho et al. 2009).

Lo anterior, muestra que la capacidad de amortiguamiento de un sustrato ante concentraciones de elementos alta es muy baja. Esto generó que la capacidad de absorción de la planta se limitará, generando EUN bajas a pesar de que en dichos tratamientos se alcanzaran rendimientos aceptables.

Conclusiones

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) alcanzó valores promedios entre 6,97 y 11,91 L planta⁻¹ semana⁻¹, en los tratamientos de nutrición baja y media respectivamente.

La conductividad eléctrica (CE) presentó valores a nivel de sustrato que van desde 1,71 hasta 8,42 mS cm⁻¹ y valores en el drenaje que van desde 0,24 hasta 2,84 mS cm⁻¹.

El potencial de hidrógeno (pH) no presenta diferencia entre tratamientos (interacción) ni por efectos separados.

El porcentaje de drenaje (%Dr) presentó valores promedios que van desde 4,89% hasta un 10,15%.

La eficiencia de uso de agua (EUA), alcanzaron en rendimientos comerciales valores promedio que van desde 26,5 kg m⁻³ hasta 31,31 kg m⁻³.

La eficiencia de uso de nutrientes (EUN) fue baja para casi todos los elementos, excepto Fe que alcanzó valores promedio que van de 50 kg kg⁻¹ a 65 kg kg⁻¹.

Recomendaciones

Literatura consultada

- Abad, M; Martínez, P; Martínez, M; Martínez, J. 1993. Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo. *Actas de horticultura*. 11: 141-154
- Adams, P; Ho, L. 1993. Effect of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant Soil* 154: 127-132
- Agbemaflé, R; Owusu-Sekyere, J; Bart-Plange, A. 2015. Effect of deficit irrigation and storage on the nutritional composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Pectomech). *Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition*. 10(1-2): 59-65.
- Aguayo, E; Escalona, V; Artés, F. 2004. Quality of fresh-cut tomato as affected by type of cut, packaging, temperature and storage time. *European Food Research and Technology*. 5(219): 492-499.
- Alcántar, G; Villareal, M; Aguilar, A. 1999. Tomato growth (*Lycopersicon esculentum* Mill), and nutrient utilization in response to varying fertigation programs. *Acta Horticulturae*. 481: 385-391.
- Allen, R; Smith, M; Pereira, L; Pruitt, W. 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. In: Chantzoulakes, K.S. *Acta Horticulturae*. 17-33.
- AlShrouf, A. 2017. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences*. 27: 247-255.
- Alvarado, P. 2009. Manual del cultivo de tomate: Riego en tomate (en línea). (Chile, Nodo Hortícola). Universidad de Chile. 25-29 p. Consultado 22 oct. 2016. Disponible en <http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/ManualCultivotomate.pdf>
- Ansorena, M. 1994. Sustratos, propiedades y caracterización. Editorial Mundi-Prensa, Madrid. 172 p.
- Arévalo, G. 2015. Determinación de la eficiencia de manejo de nutrientes y agua en tres variedades de pimiento de color (*Capsicum annuum* L.) bajo

- hidroponía en condiciones de invernadero en MULACAGUA, Departamento de Comayagua, Honduras. Tesis doctoral. Universidad de Almería. 204 p.
- Arizaleta, M; Rodríguez, O; Rodríguez, V. 2002. Relación de los índices DRIS, índices de balance de nutrientes, contenido foliar de nutrientes y el rendimiento del café en Venezuela. *Bioagro*. 14(3):153-159.
- Azcón, J; Talón, M. 2008. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. McGraw Hill. Interamericana. 651 p.
- Baca, C; Rodríguez, C; Quevedo, N. 2016. *La solución nutritiva en hidroponía*. 1 ra. (Ed.). México. 197 p.
- Bakker, J. 1990. Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill. *Journal of Horticultural Science*. 65: 323-331.
- Baker, J. 1990. Measuring water potential in soils and plants. *Remote Sensing Reviews*. 5: 263-279.
- Bertsch, F. 2006. El recurso tierra en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(1):133-156.
- Betancourt, P; Pierre, F. 2013. Extracción de macronutrientes por el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var. Alba) en casas de cultivo en Quíbor, estado Lara. *Bioagro*. 25 (3): 181-188.
- Blaney, H; Criddle, W. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA(SCS). 48pp.
- Bracho, J; Pierre, F; Quiroz, A. 2009. Caracterización de componentes de sustratos locales para la producción de plántulas de hortalizas en el estado Lara, Venezuela. *Bioagro*. 21(2): 117-124.
- Campbell, G. 1990. Measuring water potential in soils and plants. *Remote Sensing Reviews*. 5: 249-261.

- Campillo, C; Gordillo, J; Santiago, L; Cordoba, A; Martinez, L; Prieto, M; Fortes, R. 2017. Development of an efficient water management system in commercial processing tomato farms. *Acta Horticulturae*. 1159: 23-30.
- Cassel, D; Kachanoski, R; Topp, G. 1994. Practical consideration for using a TDR cable tester. *Soil Technology*. 7(2): 113-126.
- Castilla, N. 2004. Invernaderos de plástico tecnología y manejo. Mundi Prensa, España. p. 457.
- Cestoni, F; De Jovel, G; Urquilla, A. 2006. Perfil de negocios de tomate cherry o cereza hacia el mercado de los Estados Unidos (en línea). Consultado 5 abr. 2019. Disponible en http://www.academia.edu/7215115/PERFIL_DE_NEG
- Cometti, N; Furlani, P; Ruiz, H; Fernandes, E. 2006. Soluções nutritivas: formulação e aplicações. *Nutrição Mineral de Plantas*. 432 p.
- Cuervo, B; Flores, R; Gonzáles, M. 2012. Aspects to consider for optimizing a substrate culture system with drainage recycling. *Agronomía Colombiana*. 30(3):379-387
- Déniel, F.; Renault, D.; Tirilly, Y.; Barbier, G. and Rey, P. 2006. A dynamic biofilter to remove pathogens during tomato soilless culture. *Agronomy for Sustainable Development*. 26(3):185-193.
- Díaz, C. 2007. Caracterización Agro cadena de Tomate. Dirección Regional Central Occidental. M.A.G. Grecia, Costa Rica. 46 p.
- Díaz, V. 2014. Perfil comercial tomate (en línea). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Guatemala. 11 p. Consultado 21 feb. 2015. Disponible en <http://web.maga.gob.gt/download/Perfil%20tomate.pdf>
- Dobermann, A. (2007) Nutrient use efficiency. Measurement and management. In: Kraus, A., Isherwood, K. and Heffer, P., Eds., *Fertilizers Best Management Practices. Proceeding of International fertilizer Industry Association*. Brussels, Belgium. 1-22.
- Elliott, J; Deryng, D; Müller, C; Frieler, K; Konzmann, M; Gerten, D; Glotter, M; Flörke, M; Wadah, I; Besta, N; Eisnerg, S; Feketei, BM; Folberth, C;

- Fostera, I; Goslingk, SN; Haddelandl, I; Khabarovm, N; Ludwign, F; Masakio, Y; Olinp, S; Rosenzweigc, C; Ruanec, AC; Satohr, Y; Schmid, E; Stacket, T; Tangu, Q; Wisser, D. 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 111(9):3239-3244.
- Escalona, A; Pire, R. 2008. Crecimiento y extracción de N-P-K por plantas de pimentón (*Capsicum annum* L.) abonadas con estiércol de pollo en Quíbor, estado Lara. *Revista de la Facultad de Agronomía LUZ*. 25: 243-260.
- Escobar, H; Lee, R. 2009. Manual de producción de tomate bajo invernadero. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 2 ed. 40 p.
- Fajardo, E; Benitez, D; Rodríguez, N; Rivera, A; Bernal, R. 2016. Sustrato y sistema de riego óptimos para la producción de tomate bajo condiciones de invernadero (en línea). *Investigación Innovación Ingeniería*. Bogotá, Colombia 3(1):1-16 Consultado 22 de mar. 2017. Disponible <https://www.google.com/webhp?sourceid=chrome-v=2&ie=UTF-8#q=riego+para+tomate+en+costa+rica&start=10&instant&ion=1&esp>
- Fayad, J; Fontes, P; Cardoso, A; Finger, F; Ferreira, F. 2002. Absorção de nutrientes pelo tomateiro cultivado sob condições de campo e de ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, Brasília. 20(1): 90-94.
- Fernández, R; Camacho, F. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros*. Universidad de Almería en España. 86-89.
- Flores, J; Ojeda.Bustamante, W; López, I; Rojano, A; Salazar, I. 2007. Requerimientos de riego para tomate en invernadero. *Terra Latinoamericana*. 25(2): 127-134.
- Gil-Vázquez, I; Sánchez del Castillo, F; Miranda-Velázquez, I. 2003. Producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero. *Agribot*, Chapingo, México. p. 90.
- Gleick, P; Christian, J; Cooley, H. 2011. Water use efficiency and productivity: re-thinking the basin approach. *Water International*. 36(7): 784–798.

- González, A; Hernández, B. 2000. Estimación de necesidades hídricas del tomate. *Terra Latinoamericana*. 18: 45-50.
- González, G; Ramos, J; Ramos, J; Arredondo, J; Chávez, L; Reyes, F. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(4): 367-374.
- González, V; Pomares, F. 2008. La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos. *Sociedad Española de Agricultura Ecológica*. p.1-24.
- Hochmuth, G; Hochmuth, R. 1996. Survey of greenhouse vegetable production in Florida. Florida Cooperative Extension Service. Suwannee Valley Research and Education Center Report. p.12.
- Huertas, C. 2019. Validación de la Canaleta de Demanda Inteligente como control de riego utilizando sondas capacitivas, en tomate (*Solanum lycopersicum*) var. Gladiador en sistema hidropónico bajo invernadero (Tesis, Licenciatura). Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Imas, P. 2009. Manejo de nutrientes por fertirriego en sistemas frutihortícolas (en línea). Consultado 24 jul. 2019. Disponible en <http://www.itescam.edu.mx/principal/syllabus/fpdb/recursos/r16614.DOC>
- Isherwood, K.F. 1990. IFA, 5th AFA International Annual Conference. (en línea) Cairo, Egypt. Consultado 24 jul. 2019. Disponible en <http://www.fertilizer.org>.
- Janssen, B.H. 1998. Efficient use of nutrients: An art of balancing. *Field Crops Res.* 56: 197-201.
- Jara, J; Valenzuela, A. 2000. Necesidades de agua de los cultivos, Riego y Drenaje. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción, Chillán, Chile. 24 p.
- Jaramillo, J; Rodríguez, V; Gil, L; García, M; Clímaco, J; Quevedo, D; Sánchez, G; Aguilar, P; Pinzón, L; Zapata, M; Restrepo, J; Guzmán, M. 2013. Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas (en línea). Bogotá, Colombia. 282 p. Consultado 10 may. 2016. Disponible en

<https://es.scribd.com/doc/200000905/Tecnologia-para-el-cultivo-del-Tomate-CLIENTE-pdf>

Jaramillo, J; Rodríguez, V; Guzmán, M; Zapata, M; Rengifo; T. 2007. Buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción de tomate bajo condiciones protegidas (en línea). Manual técnico. CORPOICA-FAO-MAMA. Antioquia, Colombia. 314 p. Consultado 31 oct. 2015. Disponible en <http://www.fao.org.co/manualtomate.pdf>

Jones, J. 2008. Tomato Plant Nutrition. Taylor y Francis Group. 129-177 p.

Kirda, C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance: Deficit irrigation practices. FAO, Rome. 22: 3-10.

Lagunas, A. 2013. Evaluación del manejo del riego por medio de sensores de humedad del suelo en un cultivo de tomate para industria. Universidad Pública de Navarra. 74 p.

Lara, A. 1999. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. Terra. 17(3): 221-229.

León, M; Cun, R. 2001. Necesidades hídricas del tomate en ambiente protegido en las condiciones de Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 10(3): 67-71.

López, A.; Cano, M; Rodríguez, D; Torres, F; Rodríguez, R; Rodríguez, R. 2011. Efecto de diferentes concentraciones de potasio y nitrógeno en la productividad de tomate en cultivo hidropónico. Tecnociencia. 5(2):98-104

López, L. 2016. Rendición de cuentas de la agrocadena de tomate (Power point). (San José, Costa Rica). Programa Nacional Sectorial de tomate. Ministerio de Agricultura y Ganadería. 16 p.

López, A; Benavides, C. 2014. Respuesta térmica del invernadero de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Agronomía Mesoamericana. 25: 121-132.

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

- Magán, J; Gallardo, M; Thompson, R; Lorenzo, P. 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soilless culture in greenhouses in mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*. 95:1041-1055.
- Magán, J. 2003. Efectos de la salinidad sobre el tomate en cultivo en sustrato en las condiciones del sureste peninsular: Resultados experimentales. Centro de Investigación y Formación Agraria de Almería. 14 p.
- Manjarrez, J. 1980. Riegos. El cultivo del tomate para consumo fresco en el valle de Culiacán. CEVAS-CIAPAN-SARH. 225p
- Mogammah, F; Al-Ghorabi, H; El Marazky, M. 2013. Adoption of intelligent irrigation scheduling technique and its effect on water use efficiency for tomato crops in arid regions. *Australian Journal of Crop Science*. 7(3): 305-313.
- Molina, E. 2016. Fertilización de tomate (en línea). Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 51 p. Consultado 10 mar. 2017. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/FERTILIZACION%20TOMATE%202016.pdf>
- Monardes, H. 2009. Manual de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill): Características botánicas. Origen (en línea). Chile. Universidad de Chile 13 p. Consultado 8 oct. 2016. Disponible en http://www.cepoc.uchile.cl/pdf/Manua_Cultivo_tomate.pdf
- Monteith, J; Unsworth, M. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London. 291 p.
- Mora, S; Quirós, Y. 2019. Boletín estadístico agropecuario. (en línea). SEPSA. Consultado 30 nov.2019. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/BEA-0029.PDF>
- Morales D; Rodríguez, P; Dell'Amico, J; Torrecillas, A; Sánchez, M. 2006. Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* mill. cv. amalia). *Cultivos Tropicales*. 27: 45-48.

- Moreno, P; Castillo, S; Gutiérrez, T; González, M; Pineda, P. 2015. Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21(5): 43-55.
- Munns, R; Greenway, H; Delane, R; Gibbs, J. 1982. Ion concentration and carbohydrate status of elongating leaf tissue of *Hordeumvulgare* growing at high external NaCl; II Cause of the growth reductions. *Journal of Experimental Botany*. 33: 574-583.
- Ojodeagua, J; Castellanos, J; Muñoz, J; Alcántar, G; Tijerina, L; Vargas, P; Enríquez, S. 2008. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 31(4): 367-374.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2013. Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Informe sobre temas hídricos. 38: 97.
- Pardossi, A; Carmassi, G; Diara, C; Incrocci, L; Maggini, R; Massa D. 2011. Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture. *Euphoros*. 1ra. (Ed.). Pisa, Italia. University of Pisa. 63 p
- Pardossi, A; Tognoni, F; Incrocci, L. 2004. Mediterranean Greenhouse Technology, the World of Horticulture. *Chronica Horticultural*. 44(2): 28-34.
- Peet, M; Willits, D. 1995. Role of excess water in tomato fruit cracking. *Horticultural Science*. 30: 65-68.
- Penman, H. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society London Proceedings*.120-146.
- Pereira, L; Oweis, T; Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*. 57: 175-206.
- Prenger, J; Ling, P. 2001. Greenhouse Condensation Control: Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD). *Extension Fast Sheet*. 4 p.
- Ramírez, C; Nienhuis, J. 2012. Cultivo protegido de hortalizas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 25(2): 10-20.

- Ramos, C; Alcántar, G; Galvis, A; Peña, A; Martínez, A. 2002. Eficiencia de uso del nitrógeno en tomate de cáscara en fertirriego. *Terra Latinoamericana*. 20(4): 465-469.
- Rincón, L. 2003. La fertirrigación del tomate y del pimiento grueso (en línea). Murcia, España. *Vida Rural*. 48-54 p. Consultado 28 oct. 2016. Disponible en http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdfvrral/Vrural_2003_164_36_40.pdf
- Rivas, F. 2017. Sistema automático de fertirriego adaptable a las necesidades de la agricultura costarricense (Tesis, Licenciatura). Universidad de Costa Ricas, San José, Costa Rica.
- Rojas, J; Castillo, M. 2007. Diagnóstico de la Agro Cadena del cultivo de tomate de la Región Central Sur (en línea). MAG. San José, Costa Rica. 72 p. Consultado 20 mar. 2015. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00063.pdf>
- Rosa, M; Bezerra, F; Araújo, F; Noróes, E. 2001. Utilização do pó da casca de coco verde na germinação de alface hidropônico. *Horticultura Brasileira*. 19(2):294 p.
- Sánchez-Del C, F; Moreno, P; Pineda, P.; Osuna, J. M; Rodríguez, P. J. E; Osuna, E. T. 2014. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*. 2(48): 185-197.
- Salazar-Moreno, R; Rojano-Aguilar, A; López-Cruz, I. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5(2): 177-183.
- Savvas, D. 2003. Hydroponics: a modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. *Food Agriculture and Environment Journal*. 1: 80-86.
- Semillaria. 2015. Clasificación taxonómica de tomate (en línea). s.p. Consultado 10 may. 2016. Disponible en <http://semillaria.es/index.php/cultivos-ok/29-cultivos/94-taxonomia>

- Soto, F; Gallardo, M; Giménez, C; Peña-Fleitas, T; Thompson, R. 2014. Simulation of tomato growth, water and N dynamics using the EU-Rotate_N model in Mediterranean greenhouses with drip irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management*. 132: 46-59.
- Soto, F. 2017. Manejo de soluciones nutritivas. Entrevista personal 2017.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo de agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense*. 42(2): 59-73.
- Thompson, R; Martinez-Gaitan, C; Gallardo, M; Gimenez, C; Fernandez, M. 2007. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agricultural Water Management*. 89: 261-274.
- Thornthwaite, C. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 55-94.
- Tilman, D; Cassman, K; Matson, P; Naylor, R; Polasky, S. 2002. Agriculture sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418(6898): 671-677.
- Tjalling, H. 2006. Guía de manejo nutrición vegetal de especialidad: tomate (en línea). CropKit. SQM. 80 p. Consultado 10 may. 2016. Disponible en http://www.sqm.com/Portals/0/pdf/cropKits/SQM-Crop_Kit_Tomato_L-ES.Pdf
- Torres, A; López, R. 2010. Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos. Departamento de Horticultura y Arquitectura de Áreas Verdes, Purdue University. 7 p.
- Villar, J; Elías, F. 1996. Evapotranspiración.en: Elías, F. y Castellví, F. *Agrometeorología*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi Prensa. 259-278.
- Wittwer, S; Castilla, N. 1995. Protected cultivation of horticultural crops worldwide. *HortTechnology*. 5(1): 6-22.
- Zamora, E. 2016. El cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* L. Mill) bajo

cubiertas plasticas. Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería. 12 p.

Anexos

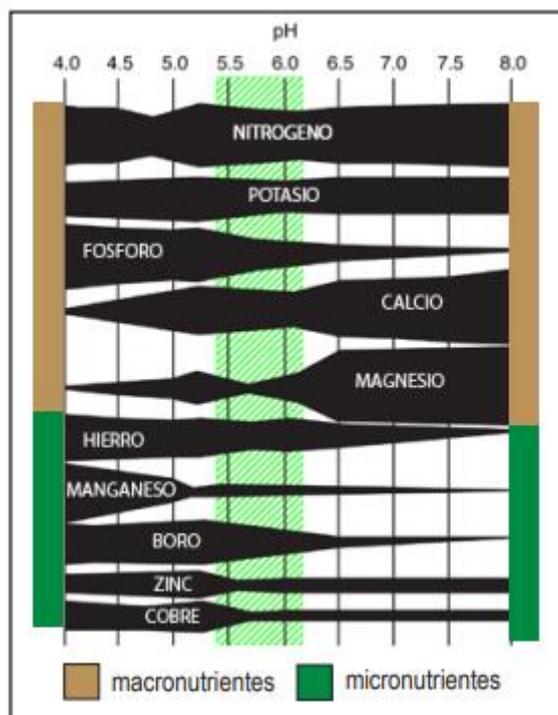


Figura 32. El pH de los sustratos afecta la cantidad de nutrientes disponibles a las plantas. El área sombreada representa los niveles recomendados para la mayoría de los cultivos bajo invernadero.

Cuadro 5. Análisis de la varianza para la variable Evapotranspiración del cultivo.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
ET _c	18	0.89	0.84	9.58	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	85.66	5	17.13	19.12	<0.0001
Nutrición	80.11	2	40.05	44.70	<0.0001
Riego	3.11	1	3.11	3.47	0.0872
Nutrición*Riego	2.45	2	1.22	1.37	0.2923
Error	10.75	12	0.9		
Total	96.42	17			

Cuadro 6. Análisis de la varianza para la variable conductividad eléctrica en sustrato.

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
EC Sustrato	18	0.89	0.84	23.34

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	146.37	5	29.27	18.96	<0.0001
Nutrición	137.58	2	68.79	44.55	<0.0001
Riego	2.56	1	2.56	1.66	0.2221
Nutrición*Riego	6.23	2	3.11	2.02	0.1758
Error	36.63	12	3.05		
Total	171.95	17			

Cuadro 7. Análisis de la varianza para la variable conductividad eléctrica en drenaje.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
EC	18	0.92	0.89	26.78	
F.V.	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	20.79	5	4.16	28.86	<0.0001
Nutrición	20.74	2	10.37	71.95	<0.0001
Riego	0.03	1	0.03	0.2	0.6628
Nutrición*Riego	0.03	2	0.01	0.1	0.9084
Error	1.73	12	0.14		
Total	22.52	17			

Cuadro 8. Análisis de la varianza para la variable potencial de Hidrógeno en drenaje.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
pH	18	0.10	0.00	8.85	
F.V.	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	0.50	5	0.10	0.27	0.9217
Nutrición	0.09	2	0.05	0.12	0.8868
Riego	2.0E-04	1	2.0E-04	5.30E-04	0.9819
Nutrición*Riego	0.41	2	0.21	0.55	0.5909
Error	4.49	12	0.37		
Total	4.49	17			

Cuadro 9. Análisis de la varianza para la variable porcentaje de drenaje.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
%Dr	18	0.73	0.62	18.98	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	54.17	5	10.83	6.60	0.0036
Nutrición	8.30	2	4.15	2.53	0.1213
Riego	23.78	1	23.78	14.48	0.0025
Nutrición*Riego	22.09	2	11.04	6.73	0.0110
Error	19.70	12	1.64		
Total	73.88	17			

Cuadro 10. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de primera.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
EUA primera	18	0.26	0.00	13.42	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13.31	5	2.66	0.84	0.5480
Nutrición	12.14	2	6.07	1.91	0.1905
Riego	0.88	1	0.88	0.28	0.6075
Nutrición*Riego	0.29	2	0.14	0.04	0.9562
Error	38.16	12	3.18		
Total	51.47	17			

Cuadro 11. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de segunda.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
EUA segunda	18	0.54	0.35	16.02	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	28.13	5	5.63	2.83	0.0648
Nutrición	21.67	2	10.84	5.46	0.0206
Riego	1.18	1	1.18	0.59	0.4566
Nutrición*Riego	5.28	2	2.64	1.33	0.3010
Error	23.84	12	1.99		
Total	51.97	17			

Cuadro 12. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos de tercera.

Variable	N	R²	R² Aj	CV	
EUA tercera	18	0.81	0.73	17.43	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	66.78	5	13.36	10.13	0.0006
Nutrición	56.52	2	28.26	21.44	0.0001
Riego	4.87	1	4.87	3.69	0.0787
Nutrición*Riego	5.39	2	2.69	2.04	0.1723
Error	15.82	12	1.32		
Total	82.6	17			

Cuadro 13. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de agua en frutos comerciales totales.

Variable	N	R²	R² Aj	CV
EUA comercial total	18	0.55	0.36	8.84

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	93.26	5	18.65	2.9	0.0607
Nutrición	71.18	2	35.59	5.53	0.0198
Riego	5.52	1	5.52	0.86	0.3724
Nutrición*Riego	16.55	2	8.28	1.29	0.3116
Error	77.17	12	6.43		
Total	170.43	17			

Cuadro 14. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Nitrógeno.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
N	18	0.78	0.69	35.4	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.09	5	0.02	8.52	0.0012
Nutrición	0.09	2	0.05	20.72	0.0001
Riego	9.4E-04	1	9.4E-04	0.43	0.5233
Nutrición*Riego	1.6E-03	2	8.2E-04	0.38	0.6928
Error	0.03	12	2.2E-03		
Total	0.12	17			

Cuadro 15. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Fósforo.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
P	18	0.51	0.3	26.71	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	5	3.0E-03	2.48	0.0919
Nutrición	0.01	2	0.01	4.15	0.0427
Riego	3.2E-03	1	3.2E-03	2.65	0.1292
Nutrición*Riego	1.7E-03	2	8.7E-04	0.72	0.5071
Error	0.01	12	1.2E-03		
Total	0.03	17			

Cuadro 16. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Potasio.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
K	18	0.71	0.59	35.07	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.06	5	0.01	5.95	0.0054
Nutrición	0.05	2	0.03	13.72	0.0008
Riego	3.5E-03	1	3.5E-03	1.78	0.2074
Nutrición*Riego	1.0E-03	2	5.1E-04	0.26	0.7764
Error	0.02	12	2.0E-03		
Total	0.08	17			

Cuadro 17. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Calcio.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
Ca	18	0.75	0.65	30.22	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.04	5	0.01	7.23	0.0024
Nutrición	0.03	2	0.02	16.42	0.0004
Riego	2.0E-04	1	2.0E-04	0.19	0.6719
Nutrición*Riego	3.3E-03	2	1.7E-03	1.57	0.2478
Error	1.0E-02	12	1.1E-03		
Total	0.05	17			

Cuadro 18. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Magnesio.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
Mg	18	0.78	0.69	36.66	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.05	5	0.01	8.69	0.0011
Nutrición	0.05	2	0.02	21.32	0.0001
Riego	8.0E-04	1	8.0E-04	0.73	0.4082
Nutrición*Riego	1.0E-04	2	5.0E-05	0.05	0.9553
Error	0.01	12	1.1E-03		
Total	0.06	17			

Cuadro 19. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Azufre.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
S	18	0.79	0.71	32.53	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.03	5	0.01	9.29	0.0008
Nutrición	0.03	2	0.02	22.18	0.0001
Riego	0.0000056	1	5.6E-06	0.01	0.9308
Nutrición*Riego	1.5E-03	2	7.4E-04	1.05	0.3809
Error	0.01	12	7.1E-04		
Total	0.04	17			

Cuadro 20. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Hierro.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
Fe	18	0.79	0.7	31.95	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.84	5	0.17	8.98	0.001
Nutrición	0.83	2	0.41	22.08	0.0001

Riego	0.01	1	0.01	0.36	0.5579
Nutrición*Riego	0.01	2	3.5E-03	0.19	0.8317
Error	0.22	12	0.02		
Total	1.07	17			

Cuadro 21. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Zinc.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
Zn	18	0.82	0.74	27.96	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.09	5	0.02	10.78	0.0004
Nutrición	0.05	2	0.02	15.17	0.0005
Riego	0.02	1	0.02	15.07	0.0022
Nutrición*Riego	0.01	2	0.01	4.25	0.0403
Error	0.02	12	1.6E-03		
Total	0.11	17			

Cuadro 22. Análisis de la varianza para la variable Eficiencia de uso de nutriente en el elemento Manganeso.

Variable	N	R2	R2 Aj	CV	
Mn	18	0.67	0.54	27.23	
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.03	5	0.01	4.93	0.011
Nutrición	0.03	2	0.01	12.13	0.0013
Riego	2.7E-04	1	2.7E-04	0.25	0.6244
Nutrición*Riego	1.4E-04	2	7.2E-05	0.07	0.9355
Error	0.01	12	1.1E-03		
Total	0.04	17			



Figura 33. Vista panorámica de la ubicación de los tratamientos en el invernadero de la EEAFBM.

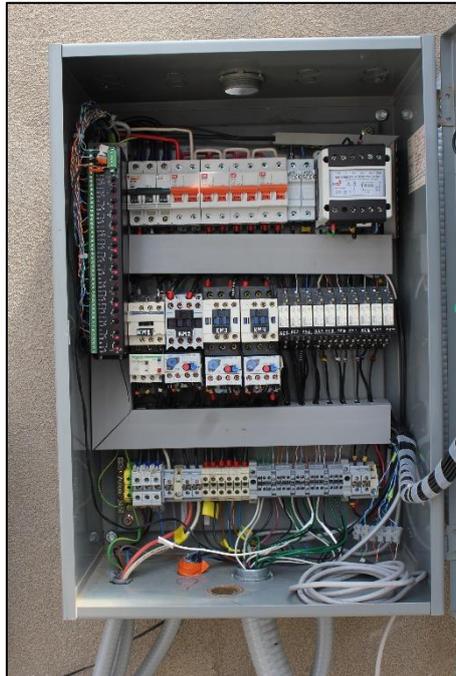


Figura 34. Sistema electrónico de control de los sensores en campo.



Figura 35. Reservorios de solución nutritiva de los diferentes tratamientos.

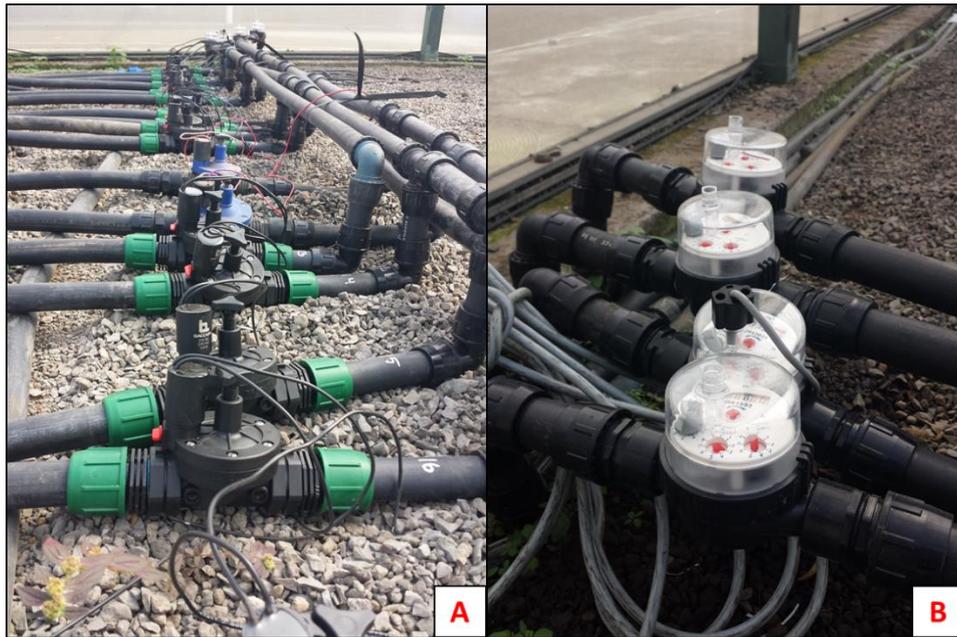


Figura 36. Componentes del sistema de riego automático. A. Sistema de electroválvulas y B. Medidores de caudal.



Figura 37. Vista desde debajo de la canaleta de demanda inteligente.



Figura 38. Quinta cosecha de tomate de todos los tratamientos.

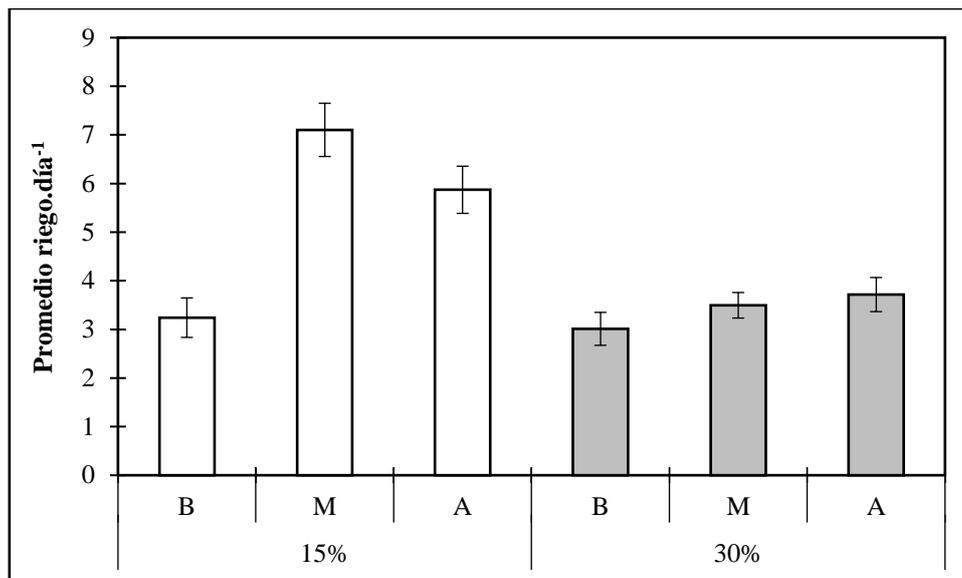


Figura 39. Cantidad promedio de riegos día⁻¹ aplicados en los diferentes tratamientos. Las barras indican el error estándar.

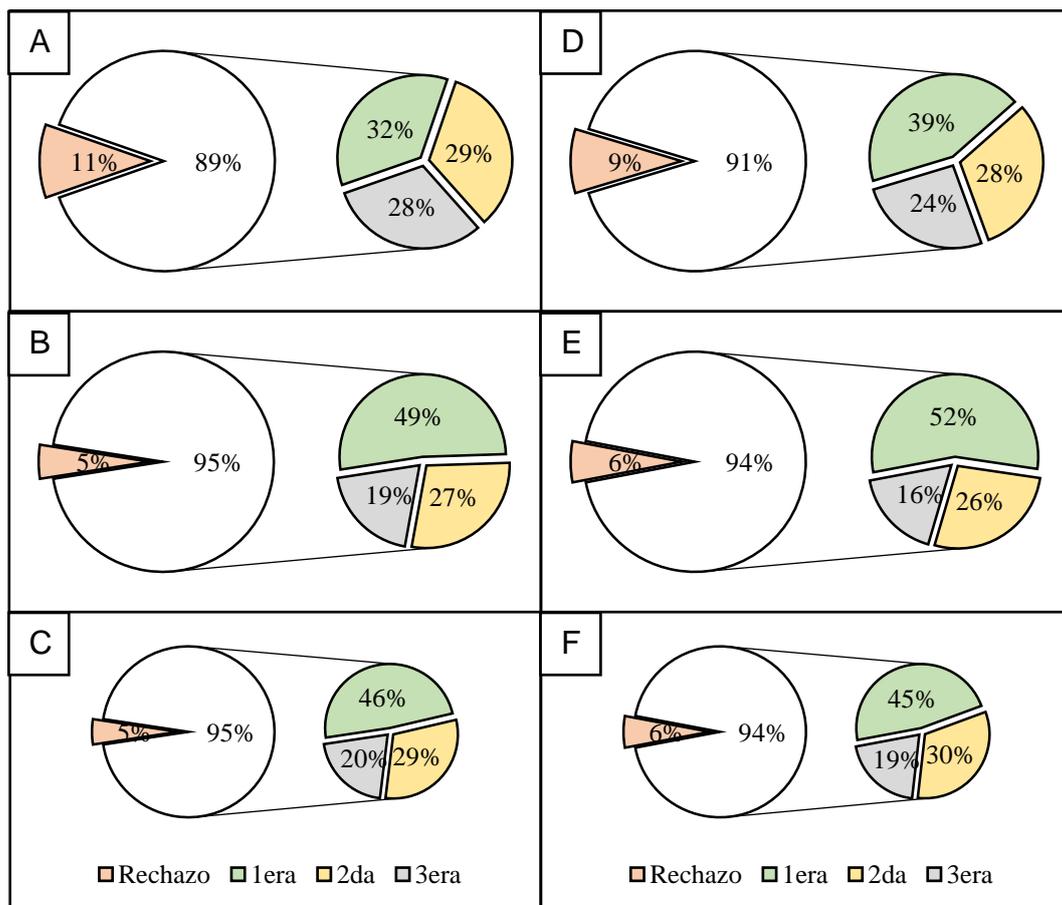


Figura 40. Frecuencia del calibre obtenida en los diferentes tratamientos. Fragmentos de color blanco indican el rendimiento comercial total.

Donde: A = B15%, B = M15%, C = A15%, D = B30%, E = M30% y F = A30%.

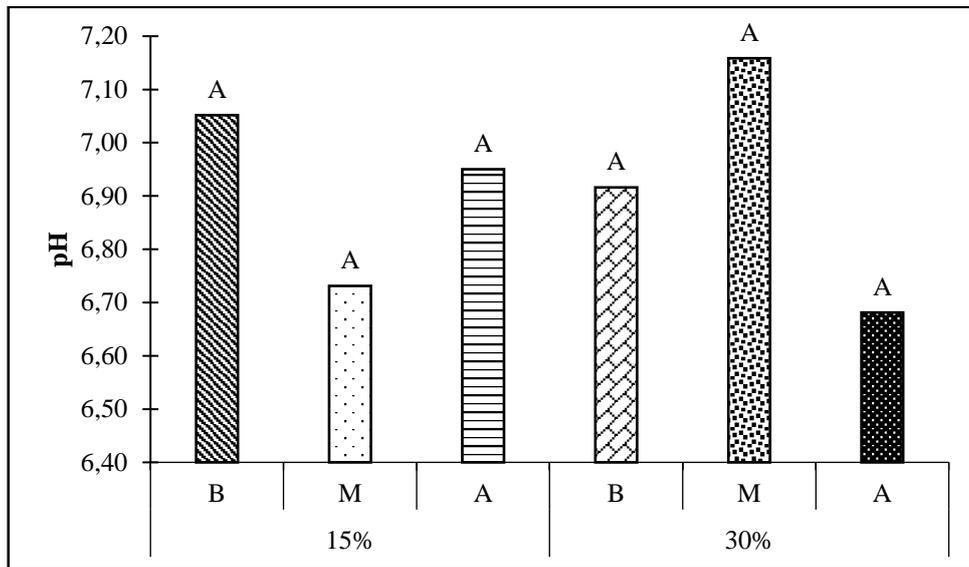


Figura 41. Análisis estadístico del comportamiento de la variable pH en los diferentes tratamientos. Letras diferentes indican una diferencia significativa de acuerdo con la prueba Tukey ($p < 0,05$).

Cuadro 23. Comportamiento de la EC y pH en la solución nutritiva aplicado en el cultivo durante la investigación.

Solución Nutritiva	EC	pH
Baja	1.0	6.3
Media	1.8	6.0
Alta	2.6	5.8