



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA Y NUTRIMENTAL DE JITOMATE EN INVERNADERO UTILIZANDO EL MODELO DE CRECIMIENTO HORTSYST

ELSAR BARTOLOMÉ ROBLERO ANGEL

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: *Caracterización fisiológica y nutrimental de jitomate en invernadero utilizando el modelo de crecimiento HORTSYST*, realizada por el estudiante: **Elsar Bartolomé Roblero Angel**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR


CONSEJERO


Dr. Prometeo Sánchez García

CO-DIRECTOR


Dr. Antonio Martínez Ruíz

ASESOR


Dr. Ernesto Gabriel Alcántar González

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, septiembre de 2022

CARACTERIZACIÓN FISIOLÓGICA Y NUTRIMENTAL DE JITOMATE EN INVERNADERO UTILIZANDO EL MODELO DE CRECIMIENTO HORTSYST

Elsar Bartolomé Roblero Angel, M.C
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Uno de los desafíos actuales en los sistemas agrícolas, es buscar alternativas para producir más, en menores superficies agrícolas, buscando la optimización del uso del agua y la aplicación racional de los fertilizantes en los cultivos. El desarrollo y aplicación de la modelación de cultivos a los sistemas de producción, ha ayudado a mejorar el manejo de los recursos y a la toma acertada de decisiones en el manejo de los agrosistemas. Por lo tanto, en esta investigación se evaluó la caracterización morfológica, fisiológica y nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero en un sistema hidropónico a tres densidades. Así como la calibración y validación del modelo de crecimiento HORTSYST, para predecir la producción de materia seca, consumo de agua por transpiración y nutrimentos e índice de área foliar. Se encontraron dos experimentos con jitomate hidropónico saladette, de ciclo primavera-verano, el primero se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, utilizando “tezontle” como sustrato a una densidad de 3.5 plantas por m². El segundo se realizó en las instalaciones del INIFAP C-E San Martinito, Puebla, usando “tepetzil” como sustrato, en este se evaluaron las características morfológicas, fisiológicas y nutrimentales en tres densidades: 2.6 plantas m⁻² (T1), 3.5 plantas por m⁻² (T2) y 4.3 plantas m⁻² (T3). Se realizó un análisis estadístico (Prueba tukey, $\alpha=0.05$) a los resultados obtenidos, encontrando diferencias estadísticas significativas por tratamiento. Para la calibración del modelo se obtuvo el primer experimento, mientras que para la validación se emplearon los datos del T2 del segundo experimento. Para la evaluación, se emplearon los siguientes estadísticos: sesgo (BIAS), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), eficiencia de modelado (EF) y coeficiente de determinación (R^2). En la calibración todas las variables simuladas tuvieron una EF y R^2 mayores que 95%, mientras que en la validación la mayoría resultó superior de 80%, excepto para P_{up} , que presentó una EF de 48%. En la mayoría de las variables de salidas evaluadas los resultados de bondad de ajuste fueron aceptables. El rendimiento del modelo resultó eficiente tanto en calibración como en validación.

Palabras clave: sustratos, rendimiento, *Solanum lycopersicum* L., uso consuntivo.

GREENHOUSE TOMATO PHYSIOLOGICAL AND NUTRITIONAL CHARACTERIZATION USING HORTSYST GROWTH MODEL

Elsar Bartolomé Roblero Angel, M.C
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

One of the current challenges in agricultural systems is to look for alternatives to produce more in less agricultural spaces, as well as the optimization of the use of water and fertilizers. The development and application of crop modeling to production systems has helped to reduce this problem, therefore, in this research the morphological, physiological and nutritional characterization of greenhouse tomato hydroponic system at three plant density was evaluated. As well as the calibration and validation of the HORTSYST growth model, to predict the production of dry matter, water consumption and nutrients in a production management of two stems per plant. Two experiments were carried out with hydroponic saladette tomato, with two stems per plant, spring-summer cycle, the first carried out at the Universidad Autónoma Chapingo, using "tezontle" as a substrate at a density of 3.5 plants m^{-2} , the second was carried out at the facilities of INIFAP C-E San Martinito, Puebla, using "tepetzil" as a substrate, with which the morphological, physiological and nutritional characteristics were evaluated at three densities: 2.6 plants m^{-2} (T1), 3.5 plants per m^{-2} (T2) and 4.3 plants m^{-2} (T3). A statistical analysis (Tukey test, $\alpha=0.05$) was performed on the results obtained, finding statistically significant differences by treatment. For the calibration of the model the first experiment was used, and for validation we used the T2 treatment of the second experiment. For the evaluation, the following statistics were used: bias (BIAS), root mean square error (RMSE), modeling efficiency (EF), and coefficient of determination (R^2). In the calibration, all the simulated variables had an EF and R^2 greater than 95%, while in the validation the majority were greater than 80%, except for P_{up} , which presented an EF of 48%, statistically acceptable values. Model performance was efficient in both calibration and validation.

Key words: substrates, yield, *Solanum lycopersicum* L., consumptive use of water.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento otorgado durante mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, por darme la oportunidad de pertenecer a dicha institución, especialmente al Posgrado de Edafología por brindarme formación académica y profesional.

Al Dr. Antonio Martínez Ruíz, por su valiosa dirección de este trabajo, por brindarme sus conocimientos, tiempo, apoyo, amistad, así como sus acertadas sugerencias y observaciones.

Al Dr. Prometeo Sánchez García, por el apoyo brindado, por su disponibilidad y sus conocimientos transmitidos.

Al Dr. Ernesto Gabriel Alcantar, por su generosidad y amabilidad de ser parte del consejo en la realización de este trabajo.

Al Dr. Manuel Sandoval Villa, por el apoyo en la revisión final de la tesis.

Al INIFAP campo experimental San Martinito, por las facilidades otorgadas en el establecimiento del experimento.

A los que me ayudaron durante la toma de datos y cuidado del cultivo, especialmente a “Edy”, Sandra, “Pethus” y Santiago. Así como a la Dra. Guadalupe y a mi muy estimada amiga “Atzin”, por su apoyo en el laboratorio.

A Lorena por su ayuda y paciencia con los trámites administrativos.

A mis amigas y amigos, Cinthia, Magali, “Bibi”, “Taly”, Marlen, Bernardo y Fermín, así como los amigos del voli, por estar ahí en los momentos difíciles, por brindarme su apoyo, confianza y amistad.

A Dios, por iluminar mi camino y permitirme llegar a esta meta.

DEDICATORIA

A mis padres: Bartolomé Roblero Roblero y Eluvia Angel Roblero, quienes han sido mi inspiración en cada paso de mi vida, por su amor y protección.

A mis hermanas Miriam, Yesenia, Yancy, Jania y mi hermano Germaín, quienes, a pesar de la distancia, me han brindado siempre su apoyo incondicional.

A mis sobrinos: Karen, Roberto, Romina, Valentín, Mía y Hazal, por ser parte de mi vida y alegrar mis días con sus sonrisas.

A toda mi familia y Amigos, por los consejos brindados durante mi vida y por siempre tener su cariño y simpatía.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA.....	vi
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, FISIOLÓGICA Y NUTRIMENTAL DE JITOMATE EN INVERNADERO EN TRES DENSIDADES DE PLANTACIÓN	3
1.1 RESUMEN	3
1.2 ABSTRACT	4
1.3 INTRODUCCIÓN	5
1.4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.4.3 Hipótesis	7
1.5 MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
1.5.1 Sitio experimental	8
1.5.2 Establecimiento del cultivo.....	8
1.5.3 Manejo del riego y nutrición	8
1.5.4 Datos climáticos.....	9
1.5.5 Determinación de la transpiración.....	9
1.5.6 Medición de variables del cultivo	10
1.5.7 Diseño experimental y análisis estadístico	11
1.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
1.6.1 Datos climáticos.....	12
1.6.2 Área Foliar e índice de área foliar	13
1.6.3 Biomasa fresca	14
1.6.4 Biomasa seca	18

1.6.5 Absorción nutrimental	20
1.6.6 Transpiración	29
1.6.7 Rendimiento.....	32
1.6.8 Productividad de agua	32
1.7 CONCLUSIONES	34
CAPÍTULO II. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HORTSYST EN JITOMATE EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN A DOS TALLOS EN INVERNADERO	
2.1 RESUMEN	35
2.2 ABSTRACT	36
2.3 INTRODUCCIÓN	37
2.4 OBJETIVOS.....	39
2.4.1 Objetivo general.....	39
2.4.2. Objetivos específicos	39
2.5 MATERIALES Y MÉTODOS	40
2.5.1 Sitio experimental	40
2.5.2 Establecimiento del cultivo.....	40
2.5.3 Estrategia de programación de riego.....	41
2.5.4 Manejo de la solución nutritiva.....	41
2.5.5 Datos climáticos.....	42
2.5.6 Determinación de la transpiración.....	42
2.5.7 Medición de variables del cultivo	43
2.5.8 Determinación de la absorción nutrimental.....	43
2.5.9 Descripción del modelo de crecimiento HORTSYST	44
2.5.10 Modelo computacional	45
2.5.11 Evaluación del modelo.....	46
2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
2.7 CONCLUSIONES	57
CONCLUSIONES GENERALES.....	58
LITERATURA CITADA.....	59

LISTA DE CUADROS

Capítulo I

Cuadro 1. Comparación de las variables morfológicas en tres densidades en el cultivo de jitomate.....	15
Cuadro 2. Comparación de la acumulación de nitrógeno y fósforo por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero.....	23
Cuadro 3. Comparación de la acumulación de potasio y calcio por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero.	26
Cuadro 4. Comparación de la acumulación de magnesio por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero	28
Cuadro 5. Productividad del agua (UAP) de fruto fresco durante el ciclo del cultivo de jitomate.....	33

Capítulo II

Cuadro 1. Parámetros obtenidos en la calibración del modelo de crecimiento HORTSYST para jitomate, con datos del experimento de 2016 (sitio UACH).....	49
Cuadro 2. Resumen de los índices estadísticos (BIAS, RMSE, EF, R^2) obtenidos en la calibración y validación del modelo HORTSYST para las variables: <i>DMP, LAI, ETc, Nup Pup, Kup, Caup y Mgup</i> en los experimentos de 2016 y 2021.....	50

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I

- Figura 1.** Temperatura media diaria del aire (A), humedad relativa (B) y radiación solar global (C) dentro del invernadero ubicado en el INIFAP, San Martinito, Puebla, México. 12
- Figura 2.** Comportamiento del Área foliar (AF) e Índice de área foliar (IAF) del cultivo de jitomate en diferentes densidades de plantación..... 14
- Figura 3.** Biomasa fresca en hojas, tallos, frutos y total en cultivo de jitomate en diferentes densidades de plantación ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 17
- Figura 4.** Biomasa seca en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 19
- Figura 5.** Nitrógeno acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total en jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 20
- Figura 6.** Fósforo acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total en jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 22
- Figura 7.** Potasio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 24
- Figura 8.** Calcio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 25
- Figura 9.** Magnesio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades ($T1=2.6$ plantas m^{-2} ; $T2=3.5$ plantas m^{-2} ; $T3= 4.3$ plantas m^{-2} ; las barras verticales indican el error estándar). 28

Figura 10. Transpiración instantánea y transpiración acumulada del cultivo de jitomate en tres densidades: 2.6 plantas m ⁻² (T1), 3.5 plantas m ⁻² (T2) y 4.3 plantas m ⁻² (T3).	30
Figura 11. Comportamiento de la transpiración del cultivo de jitomate respecto a la radiación global en tres densidades: 2.6 plantas m ⁻² (T1), 3.5 plantas m ⁻² (T2) y 4.3 plantas m ⁻² (T3).....	31

Capítulo II

Figura 1. Temperatura media diaria del aire (A), humedad relativa (B) y radiación solar global (C) para el experimento 2016 (sitio UACH: datos para la calibración) y experimento 2021 (sitio INIFAP: datos para la validación).....	47
Figura 2. <i>DMP</i> : Producción de materia seca (A); <i>LAI</i> : índice de área foliar (B y D); <i>ETc</i> : transpiración del cultivo (C) para el experimento de 2016; (<i>DAT</i> : días después del trasplante, <i>TT</i> : tiempo térmico).	51
Figura 3. Absorción de nitrógeno (<i>N_{up}</i>) (A y B); fósforo (<i>P_{up}</i>) (C y D); potasio (<i>K_{up}</i>) (E y F); calcio (<i>Ca_{up}</i>) (G y H) y magnesio (<i>Mg_{up}</i>) (I y J) para el experimento 2016; (<i>DAT</i> : días después del trasplante).....	53
Figura 4. Producción de materia seca (<i>DMP</i>) (A); índice de área foliar (<i>LAI</i>) (B Y D) y transpiración del cultivo (<i>ETc</i>) (C) para el experimento de 2021; (<i>DAT</i> : días después del trasplante, <i>TT</i> : tiempo térmico).....	55
Figura 5. Absorción de calcio (<i>N_{up}</i>) (A); fósforo (<i>P_{up}</i>) (B); potasio (<i>K_{up}</i>) (C); calcio (<i>Ca_{up}</i>) (D) y absorción de magnesio (<i>Mg_{up}</i>) (E) para el experimento de 2021; (<i>DAT</i> : días después del trasplante).	56

INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción bajo invernadero está aumentando a nivel mundial, con un estimado de 497,815 ha distribuidas en los cinco continentes (Hickman, 2018). En México existen alrededor de 47,254 ha con agricultura protegida, de las cuales 15,759 ha son destinadas a la producción de jitomate (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021). México es el principal exportador de jitomate a nivel mundial, y en 2016 contribuyó con el 25.11 % del valor de las exportaciones mundiales, cubriendo el 90.67 % de las importaciones de Estados Unidos de América y 65.31 % de Canadá (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2017).

En la agricultura protegida, y en específico en la producción del jitomate, la producción se puede incrementar con el mejoramiento de las condiciones climáticas o bien aplicando las cantidades óptimas de nutrimentos (Rodríguez *et al.*, 2015). En este sentido, se han desarrollado sistemas hidropónicos con o sin sustrato, en los que el manejo de la solución nutritiva y el riego son de los aspectos más importantes a considerar, obteniendo mejor calidad y rendimientos de los cultivos, así como en el uso eficiente del agua, fertilizantes, químicos y pesticidas (Salazar *et al.*, 2014). Sin embargo, sin un manejo adecuado, pueden presentarse problemas como una nutrición excesiva (He *et al.*, 2008), liberando el exceso de fertilizantes en el ambiente, causando problemas ecológicos (Du *et al.*, 2014). No obstante, los avances tecnológicos brindan técnicas novedosas como la simulación de cultivos bajo invernadero, principalmente en el jitomate (Gallardo *et al.*, 2011; 2014; 2016; Giménez *et al.*, 2013; Martínez-Ruiz *et al.*, 2019).

Los modelos de cultivo son modelos dinámicos complejos que simulan el crecimiento y desarrollo, considerando procesos biofísicos y bioquímicos primarios en el sistema suelo-cultivo-atmósfera, como la fotosíntesis, la respiración, la transpiración, distribución de materia seca y senescencia (Wang *et al.*, 2013). Por tanto, juegan un papel importante en el seguimiento de cultivos, predicción de rendimiento, recomendaciones de manejo de campo, evaluación de potencial productivo y evaluación del impacto del cambio climático (Van Straten *et al.*, 2010).

La perfecta sincronización entre las cantidades de agua necesarias para el crecimiento y la demanda nutricional del cultivo depende de las condiciones ambientales; por tanto, un modelo matemático podría permitir un uso altamente eficiente del suministro de agua en cultivos de invernadero (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019). Es necesario desarrollar modelos para tener un control óptimo del manejo del sistema productivo que tengan la capacidad de representar las interacciones entre el desarrollo del cultivo, las condiciones climáticas y los procesos fisiológicos de absorción de agua y nutrientes.

Por otro lado, aunque el jitomate se desarrolle en un ambiente controlado y tomando en cuenta, el clima, la nutrición y el riego, existen otros factores que limitan la producción, como son: costos de producción, asistencia técnica, tecnología aplicada, prácticas culturales, plagas, enfermedades y mercado (Tinoco *et al.*, 2014). Por ejemplo, el rendimiento de jitomate es influenciado por la densidad de plantación, ya que al aumentar o disminuir el número de plantas por unidad de superficie afecta la producción de materia seca. Por tanto, conviene valorar qué densidad de plantación puede ser la más adecuada para maximizar el rendimiento (Salazar *et al.*, 2014).

Tomando en cuenta la diversidad de sistemas existentes para producir jitomates bajo invernadero, es necesario realizar investigaciones que determinan las ventajas y desventajas de cada sistema con la finalidad de disponer información para tomar decisiones que contribuyan a mejorar la producción. Es por esto que, en esta investigación se abordan dos capítulos, en el primero se evalúan las variables de crecimiento (área foliar, índice de área foliar, biomasa fresca y seca, y rendimiento), fisiológicas (transpiración) y nutrimentales (absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio) en una densidad baja (2.6 plantas m^{-2}), media (3.5 plantas m^{-2}), y alta (4.3 plantas m^{-2}); mientras que, en el segundo capítulo se realiza la calibración y validación del modelo de crecimiento Hortsyst, el cual predice el tiempo térmico (TT), la producción total de materia seca (DMP), la absorción de nitrógeno (N_{up} , $g\ m^{-2}$), fósforo (P_{up} , $g\ m^{-2}$), potasio (K_{up} , $g\ m^{-2}$), calcio (Ca_{up} , $g\ m^{-2}$), magnesio (Mg_{up} , $g\ m^{-2}$), índice de área foliar (LAI) y transpiración (ET_c) (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; 2021), con la finalidad de que en un futuro pueda implementarse para la toma de decisiones en el manejo de la programación de riegos y nutrición de cultivos.

CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA, FISIOLÓGICA Y NUTRIMENTAL DE JITOMATE EN INVERNADERO EN TRES DENSIDADES DE PLANTACIÓN

1.1 RESUMEN

La manipulación de la densidad de plantación permite optimizar la radiación interceptada que ingresa en el dosel del cultivo, y puede ser una estrategia para incrementar rendimientos, y obtener mejor calidad en los productos cosechados. Por lo que, en esta investigación, se evaluaron las características morfológicas (área foliar, índice de área foliar, biomasa fresca y seca, y rendimiento de fruto) y nutrimentales (absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio) en un cultivo hidropónico de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. “Moctezuma” para tres densidades de plantación: 2.6 plantas m⁻² (T1), 3.5 plantas por m⁻² (T2) y 4.3 plantas m⁻² (T3). El experimento se estableció en el ciclo de primavera-verano del año 2021, en las instalaciones del INIFAP-CE San Martinito, Puebla. El trasplante se llevó a cabo el 27 de abril del 2021, utilizando como sustrato “tepetzil”. Se estableció un diseño experimental de bloques completamente aleatorizado y se realizó un análisis de varianza y pruebas de medias (Prueba Tukey, $\alpha=0.05$), encontrando diferencias estadísticas significativas por tratamiento. Al realizar el análisis por planta, el T1 obtuvo mejores resultados, tanto para biomasa fresca y seca, rendimiento de fruto y absorción nutrimental. No obstante, el efecto de la densidad de plantación invirtió los resultados, obteniendo mayor rendimiento: 14.46, 17.27 y 19.50 kg m⁻², para T1, T2 y T3, respectivamente. La extracción de macronutrientes en orden decreciente fue: K > N > Ca > P > Mg, para los tres tratamientos. La mayor extracción de N, P y K correspondió a los frutos, con un porcentaje promedio respecto a la extracción total en la planta de 54.8, 52.81 y 56.28 % respectivamente, mientras que los elementos Ca y Mg fueron extraídos principalmente por las hojas, con un valor promedio de 73.52 % para Ca y 50.84 % para Mg.

Palabras clave: sustratos, antagonismo nutrimental, expansión foliar, rendimiento de fruto.

1.2 ABSTRACT

The crop density manipulation allows to optimize the entering intercepted radiation in the crop canopy and can be used as a yield increasing strategy and obtain higher quality harvested products. On this research, morphological characteristics (foliar area, leaf area index, fresh and dry biomass, and fruit yield) and nutrients absorption (nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium) in a hydroponic tomato crop were evaluated (*Solanum lycopersicum* L.) cv. "Moctezuma" with three planting densities (treatments): 2.6 plants m⁻² (T1), 3.5 plants per m⁻² (T2) and 4.3 plants m⁻² (T3). The experiment was established during the Spring-Summer cycle of 2021, at INIFAP-CE San Martinito, Puebla, facilities. Transplant was carried out on April 27, 2021, using "tepetzil" as substrate. An analysis of variance in a completely randomized experimental block was performed, by using Tukey mean tests ($\alpha=0.05$). Significant statistical differences were found among treatments. The individual plant analysis in T1 got both, fresh and dry biomass, fruit yield and nutrient absorption, higher results. However, by introducing the crop density effect, the results got inversed, obtaining higher yield on T3, registering 14.46, 17.27 and 19.50 kg m⁻², for T1, T2 and T3, respectively. For all three treatments, the macronutrient extraction, in descending order, was: K > N > Ca > P > Mg, the higher extraction of N, P and K was given by fruits, with an average percentage of 54.8, 52.81 and 56.28 % respectively, relative to plant total extraction; while the elements Ca and Mg were extracted mainly by the leaves on average percentage of 73.52 % for Ca and 50.84 % for Mg.

Keywords: substrates, nutrient antagonism, leaf expansion, fruit yield.

1.3 INTRODUCCIÓN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza de mayor importancia a nivel nacional e internacional, su producto se demanda por su gran consumo, superficie cosechada y valor económico. La producción del jitomate está en constante crecimiento, no solo por el aumento de las áreas cultivadas, sino también por optar nuevas tecnologías que permiten elevar mayores cantidades de rendimientos (López, 2016), tal es el caso de los invernaderos o casas sombra, los cuales ofrecen protección contra las condiciones adversas del clima, así como la mejora de calidad y rendimientos en la producción de cultivos (Corella *et al.*, 2013).

Juárez-Maldonado *et al.*, (2015) consideran que, debido a la importancia que tiene el cultivo del jitomate, es necesario realizar un manejo eficiente en la agricultura intensiva, por lo que se requieren conocer los elementos que condicionan el potencial de su producción. Bajo el esquema de producción intensiva en invernadero, el manejo del agua, es de vital importancia en la producción de este cultivo, debido a que cumple una serie de funciones básicas en la vida de las plantas, constituyendo hasta un 95 % de su peso fresco (Castilla, 2005). En este sentido, la correcta aplicación de riego es uno de los principales factores que afecta el rendimiento del cultivo (Flores *et al.*, 2007). Por otro lado, Casanova *et al.*, (2007) mencionan que, otro de los factores importantes es la nutrición del cultivo, por lo que el suministro de nutrimentos en cantidades óptimas es un objetivo primordial de los programas de fertilización.

Por otra parte, la manipulación de la densidad de plantas permite optimizar la radiación interceptada, importante para usarse como una estrategia para incrementar los rendimientos (Papadopoulos & Pararajasingham, 1997; Sánchez *et al.*, 1999). La densidad de siembra depende del desarrollo del cultivo, el cual está influenciado principalmente por el cultivar elegido, sus características de crecimiento indeterminado o determinado, poda, tutorado, tipo y fertilidad de suelo, disposición y tipo de riego, así como la climatología del ciclo elegido (Carrillo, *et al.*, 2003).

Por lo anterior, la densidad juega un papel importante al aumentar o disminuir el número de plantas por unidad de superficie, lo que se atribuye al efecto en la producción de

materia seca (Salazar *et al.*, 2014). Una alta densidad de plantas aumenta la precocidad y reduce el ciclo biológico, pero los frutos producidos son de menor tamaño y calidad (Nuez, 1995). Por tanto, en esta investigación se estudió tres densidades de plantación: baja (T1, 2.6 plantas m⁻²), media (T3, 3.5 plantas m⁻²) y alta (4.3, plantas m⁻²); analizando las principales variables de crecimiento (área foliar, índice de área foliar, biomasa fresca y seca, y rendimiento), fisiológicas (transpiración) y nutrimentales (absorción de nitrógeno, fosforo, potasio, calcio y magnesio), a fin de poder obtener deducciones generales tanto a escala regional como global. La caracterización de los sistemas de producción proporciona un marco dentro del cual se pueden identificar las estrategias de desarrollo agrícola y las intervenciones apropiadas.

1.4 OBJETIVOS E HIPÓTESIS

1.4.1 Objetivo general

Realizar la caracterización morfológica, fisiológica y nutrimental de jitomate en invernadero en un sistema hidropónico a tres densidades.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las variables de crecimiento del cultivo de jitomate: área foliar, índice de área foliar, biomasa fresca y seca, y rendimiento en una densidad baja, media y alta.
- Evaluar las variables nutrimentales del cultivo de jitomate en una densidad baja, media y alta de jitomate en invernadero.
- Obtener la transpiración y la productividad de agua en tres densidades de jitomate en un sistema hidropónico bajo invernadero.

1.4.3 Hipótesis

La densidad de plantación afecta la variables morfológicas, fisiológicas y nutrimentales, así como el rendimiento de jitomate en invernadero.

1.5 MATERIALES Y MÉTODOS

1.5.1 Sitio experimental

La presente investigación se realizó durante el periodo primavera-verano del año 2021 en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental San Martinito, a una altitud de 2542 m, 19° 20' 51.43" latitud Norte y 98° 34' 3.51" longitud Oeste. Se utilizó un invernadero, de estructura metálica, con ventilación cenital, de 12 m de ancho y 52 m de largo (área superficial de 624 m²), con cubiertas de plástico de polietileno de alta densidad y malla anti-áfidos en las paredes laterales.

1.5.2 Establecimiento del cultivo

El experimento consistió en un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) tipo saladette, cultivar cv. "Moctezuma F1" de crecimiento indeterminado empleando un sistema de producción intensiva hidropónica a dos tallos por plantas. La siembra se realizó el 10 de marzo de 2021 y el trasplante se llevó a cabo el día 24 de abril de 2021 con arreglo a tresbolillo y se trasplantó en bolsas de polietileno de 40 cm x 40 cm (13 litros), utilizando "tepojal o tepetzil" (piedra pómez) como sustrato. Durante el crecimiento del cultivo se realizaron labores como tutorado, podas, deshoje, polinización manual y aplicación de fungicidas (carboxamida, cymoxanil, muncozeb) e insecticidas (clorpirifos, permetrina), con el fin de tener las mejores condiciones para el desarrollo de la planta.

1.5.3 Manejo del riego y nutrición

El sistema de riego consistió en un sistema de fertirrigación automática, suministrando un caudal de 4 Lh⁻¹ en cada maceta, se programaron 12 riegos diarios, con un tiempo de riego de un minuto, gradualmente se fue aumentando el tiempo de riego conforme a la dinámica diaria de crecimiento y desarrollo del cultivo, alcanzando hasta cuatro minutos en la duración de riego para la etapa de máximo crecimiento. La estrategia de riego tomó como base los valores de drenaje de cuatro lisímetros de drenaje instalados, incrementando el riego cuando los valores de drenaje se situaban en un 5% del volumen

aplicado, cuando se realizó la labor de deshoje se redujo el riego en un minuto por efecto de la reducción del área foliar expuesta al proceso transpirativo.

Se realizó un análisis de agua, con el fin de considerar los iones existentes en la solución nutritiva: (me L⁻¹) K⁺: 0.24, Ca²⁺: 2.19, Mg²⁺: 1.30, Na⁺: 0.54, HCO₃⁻: 2.37, Cl⁻: 0.78, SO₄²⁻: 1.72; con un PH de 7.43 y una CE de 0.47 dSm⁻¹. Se aplicó la solución universal de Steiner (1984) (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; 2020a; 2021) donde la concentración de los macronutrientes durante la etapa vegetativa fue: (me L⁻¹) NO₃⁻: 12, H₂PO₄⁻: 1.5, K⁺: 7, Ca²⁺: 9, Mg²⁺: 4, SO₄²⁻: 7 y para los micronutrientes (mgL⁻¹) Fe²⁺: 2, Mn²⁺: 1, Zn²⁺: 0.2, Cu²⁺: 0.1, al inicio de la etapa de fructificación se disminuyó en 1 meq L⁻¹ el N (NO₃⁻:11, meq L⁻¹) y aumentó 0.5 meq L⁻¹ el K (K⁺:7.5, me L⁻¹), el PH de la solución nutritiva se llevó a 6.5.

1.5.4 Datos climáticos

Se instaló una estación climática (Onset Computer Corporation) para monitorear las siguientes variables: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%) y radiación solar global (W m⁻²); para la temperatura y humedad relativa del aire se utilizó un sensor modelo S-THB-M008 (para temperatura una precisión de ± 0.21 °C de 0 °C a 50 °C, para humedad relativa precisión de ± 2.5% de 10% a 90%), colocado en el centro de cada tratamiento a 1.5 m sobre el suelo, mientras que, para la radiación solar, se ocupó un piranómetro modelo S-LIB-M003 (precisión de ±10 W m⁻²) situado a 3.5 m sobre el suelo, ambos sensores se conectaron a un datalogger modelo U-30-NRC. Los datos se almacenaron cada minuto, posteriormente se promediaron para tener datos a nivel horario.

1.5.5 Determinación de la transpiración

La transpiración se midió aplicando el método de balance (Gallardo *et al.*, 2014), el cual consiste en medir el volumen aplicado en el riego y el volumen drenado. Por lo que, se instalaron cuatro lisímetros de drenaje de manera aleatoria para cada tratamiento. Las macetas de los lisímetros se cubrieron con un plástico para evitar la evaporación y de esta manera cuantificar únicamente el agua perdida debido a la transpiración del cultivo. El registro de los datos comprendió 135 días del 18 de mayo al 30 de septiembre del

2021. El drenaje se midió diariamente antes de iniciar el riego del siguiente día, aplicándose la siguiente expresión:

$$ET_c = [(SWC_{t_0} - SWC_{t_1}) + I - D] \quad \text{Eq (1)}$$

Donde; $(SWC_{t_0} - SWC_{t_1})$ es el cambio del contenido de humedad volumétrica (ΔSWC) entre dos mediciones sucesivas de humedad (t_0 y t_1) este valor se consideró despreciable ya que el sustrato cuenta con baja capacidad de retención de humedad, I y D son el volumen aplicado en el riego, y el volumen drenado para un periodo de un día.

1.5.6 Medición de variables del cultivo

Para obtener los datos del cultivo se eligieron, por tratamiento, cuatro tallos (dos plantas) al azar para realizar muestreo cada 10 días, a los que se les determinó: biomasa fresca y seca, área foliar y absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Se midió el peso fresco por órganos (hojas, flores, tallo, raquis y frutos), posteriormente se colocaron en bolsas polypapel de estraza y se secaron en una estufa marca "TECSA" a una temperatura de 72 °C, donde permanecieron hasta obtener un peso constante. La biomasa seca se midió empleando una balanza analítica modelo 1500-2M (KERN EW) y la biomasa total se obtuvo de la suma de los pesos de los órganos de la planta. El área foliar, se estimó aplicando modelos alométricos (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019), basados en ecuaciones de regresión lineal simple y múltiple que correlaciona las dimensiones largo, ancho, y largo x ancho, correspondiente a un sistema de manejo de cultivo de jitomate hidropónico a dos tallos.

Para medir la variable de rendimiento se eligieron 4 plantas (8 tallos) por bloque de manera aleatoria, cada maceta seleccionada fue etiquetada e identificada, y se les dio seguimiento durante todo el ciclo de cultivo. Los jitomates se cortaron a medida que iban alcanzando su estado de madurez y se fue registrando el peso por planta, al final del ensayo experimental se integró el peso de cada una de las mediciones registradas para cada planta durante todo el ciclo de cultivo, el peso total se consideró como el valor de rendimiento por tallo.

La extracción nutrimental se obtuvo, a partir de las alícuotas generadas, pesando 0.5 g de materia seca al que se sometieron a digestión húmeda con una mezcla de 2 mL de ácido sulfúrico y ácido perclórico en proporción 4:2, ambos ácidos con 98% de pureza, luego se le adicionó 2 mL de peróxido de hidrógeno al 30%. Para obtener las alícuotas, las muestras fueron digeridas hasta su total mineralización a una temperatura de 200 °C durante aproximadamente seis horas, colocados sobre una plancha de arena con campana de extracción. Posteriormente, las alícuotas se aforaron con 25 mL con agua desionizada. Para finalizar, se filtraron las alícuotas obtenidas con papel Whatman No. 40 y se prosiguió a analizar los elementos. El nitrógeno se determinó por el método de Kjeldahl (Alcantar y Sandoval, 1999; Sáez-Plaza *et al.*, 2013), mientras que el P, K, Ca y Mg se determinaron mediante un equipo de espectrofotometría de emisión e inducción por plasma modelo ICP-OES 725-ES (VARIAN®).

1.5.7 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño consistió en bloques completamente aleatorizados, variando la densidad, consistentes en: 2.6 plantas m⁻² (T1), 3.5 plantas m⁻² (T2) y 4.3 plantas m⁻² (T3). La distribución de las macetas se realizó en 6 camas de doble hilera por bloque. Cada hilera contenía 17, 23 y 28 macetas, para T1, T2 y T3, respectivamente. La distancia entre centro de cada maceta fue 65 cm, 48 cm, y 39.5 cm para cada tratamiento. Además, la distancia entre pasillos, para cada bloque, fue de 1.1 m. En este sistema intensivo hidropónico se trabajó con dos tallos, considerando cada tallo como una planta (unidad experimental). Se hizo un análisis de varianza en 5 etapas del cultivo, la primera etapa comprendió de crecimiento vegetativo a los 41 DDT donde se empezaban a diferenciar los tratamientos, la segunda etapa se dio a los 62 DDT iniciando la floración y cuaje de frutos, a los 93 DDT empezó a desarrollarse los frutos (tercera etapa), la cuarta etapa empezó a los 114 DDT cuando inició la cosecha de frutos y, por último, la quinta etapa se evaluó al final de la cosecha a los 156 DDT (fin del ensayo experimental). Estas 5 etapas fueron analizadas aplicando medias de Tukey con un nivel de significancia al $\alpha = 0.05$, con el paquete estadístico R y Minitab.

1.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.6.1 Datos climáticos

La Figura 1 presenta las condiciones generales climáticas que se registraron dentro del invernadero durante el ensayo experimental.

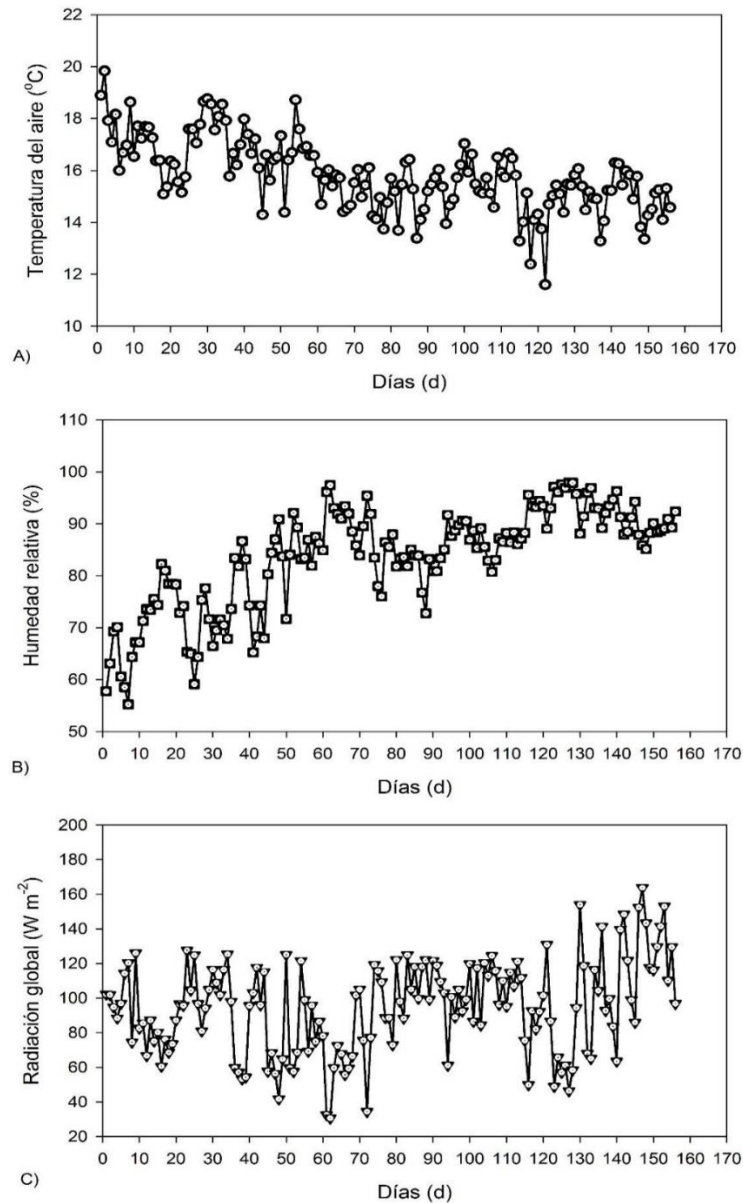


Figura 1. Temperatura media diaria del aire (A), humedad relativa (B) y radiación solar global (C) dentro del invernadero ubicado en el INIFAP, San Martinito, Puebla, México.

Las temperaturas medias más altas se presentan a inicio del experimento (20 °C) y descendieron a lo largo del ciclo hasta tener una media diaria de 15 °C, por el contrario, la humedad relativa presenta un comportamiento inverso, comenzando con un valor promedio de 65% y continúa aumentando hasta llegar al 95% al final del ciclo. Chu *et al.* (2009) reportan que la temperatura para el crecimiento y desarrollo de jitomate oscila entre 10 °C y 30 °C, por otro lado, Shamsiri *et al.* (2018), realizaron una revisión y encontraron que, el jitomate se desarrolla entre el 55% y 90% de humedad relativa. Además, la radiación solar global presentó un valor medio de 8.20 MJ m⁻² d⁻¹ (95 Wm⁻²), similar a lo reportado por Martínez-Ruiz *et al.*, (2019), quienes trabajaron con un valor de 8.89 MJ m⁻².

1.6.2 Área Foliar e índice de área foliar

Los valores obtenidos de AF e IAF de los tres tratamientos se muestran en la Figura 2. La evolución del IAF son similares al inicio del trasplante hasta los 40 DDT, después de este tiempo (etapa vegetativa y floración y cuaje de frutos) el incremento del IAF es exponencial, empezando con valores de 0.50 m² m⁻² para T1, 0.78 m² m⁻² para T2 y 0.92 m² m⁻² para T3, donde solo el T3 presentó diferencias respecto de los otros tratamientos, hasta alcanzar valores de 3.49 m² m⁻², 4.08 m² m⁻² y 6.03 m² m⁻², respectivamente, en esta segunda etapa todos los tratamientos son significativamente diferentes (Cuadro 1). A partir de los 93 DDT se vio afectado por el crecimiento y desarrollo de los frutos, ya que al situarse en una etapa de fructificación el incremento del área foliar se detiene hasta formar una meseta al final del ensayo experimental, en esta etapa no se encontraron diferencias estadísticas significativas para el área foliar, sin embargo, al evaluar el IAF, el T3 fue significativo respecto del T1 y T2. El inicio de la cosecha empezó a los 114 DDT donde el IAF se ve afectado por la caída y senescencia de hojas manteniendo un incremento constante de esta variable en cuestión. Los valores máximos de IAF obtenidos al final de la cosecha fueron de 4.35 m² m⁻², 6.04 m² m⁻² y 8.96 m² m⁻² para el T1, T2 y T3, respectivamente, siendo significativamente diferentes de acuerdo con el Cuadro 1. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron superiores a los resultados encontrados por Barraza *et al.*, (2004), donde los valores máximos de índice de área foliar para un sistema de producción a un tallo utilizando suelo como sustrato,

fueron $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $1.75 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, $2.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y $4.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para densidades de 2, 2.5, 3.3 y 5 plantas m^{-2} , respectivamente, medidos a los 105 días DDT. La densidad que presentó valores más altos de área foliar, en general, fue el T3 ($4.3 \text{ plantas m}^{-2}$) debido a un mayor número de plantas por unidad de superficie.

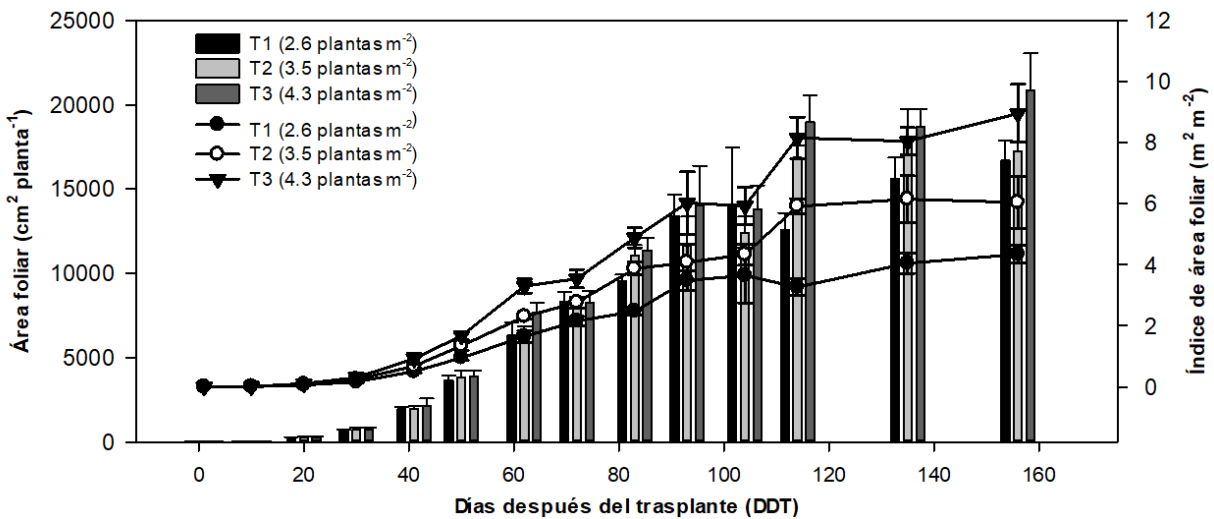


Figura 2. Comportamiento del Área foliar (AF) e Índice de área foliar (IAF) del cultivo de jitomate en diferentes densidades de plantación.

1.6.3 Biomasa fresca

En la Figura 3 se presenta la partición de la materia fresca de los tratamientos en los diferentes órganos de la planta (hojas, tallos y frutos) y la producción de biomasa fresca total. De acuerdo con la fenología del cultivo la acumulación y distribución de materia fresca por órgano, presentaron una tendencia similar (dos fases definidas) a lo largo del ciclo del cultivo para las tres densidades evaluadas, comportamiento que concuerda con lo reportado por Enriquez-Reyes *et al.* (2003), al mencionar que el tomate de crecimiento indeterminado presenta una fase de crecimiento juvenil y otra de reproducción. Se observa un comportamiento exponencial (fase de crecimiento) desde el inicio del periodo de crecimiento de hojas y tallos hasta llegar a los 114 DDT, posteriormente se estabiliza debido a la continua acumulación de biomasa en frutos (fase de reproducción), este órgano aportó de manera considerable en los valores de materia fresca total.

Cuadro 1. Comparación de las variables morfológicas en tres densidades en el cultivo de jitomate.

Variables fisiológicas	Densidad (Plantas m ⁻²)	Etapa fenológica del cultivo de jitomate				
		Vegetativa (41 DDT)	Floración y cuaje de frutos (62 DDT)	Desarrollo de frutos (93 DDT)	Inicio de cosecha (114 DDT)	Fin de cosecha (156 DDT)
Área foliar (cm ²)	2.6	1,930.73 a	6,336.61 b	13,418.67 a	12,563.54 b	16,716.51 b
	3.5	1,947.99 a	6,579.11 b	11,669.78 a	16,901.96 a	17,262.06 ab
	4.3	2,150.13 a	7,687.12 a	14,016.66 a	18,971.76 a	20,838.69 a
Índice de área foliar (m ² m ⁻²)	2.6	0.50 b	1.65 c	3.49 b	3.27 c	4.35 c
	3.5	0.68 b	2.30 b	4.08 b	5.92 b	6.04 b
	4.3	0.92 a	3.31 a	6.03 a	8.16 a	8.96 a
Peso fresco en hojas (g planta ⁻¹)	2.6	91.99 a	260.81 a	636.75 a	644.24 a	823.38 a
	3.5	92.01 a	275.34 a	464.59 a	711.09 a	845.01 a
	4.3	105.10 a	332.64 a	592.36 a	736.56 a	810.64 a
Peso fresco en tallos (g planta ⁻¹)	2.6	49.13 a	151.51 b	301.02 a	402.46 a	422.22 a
	3.5	43.16 a	158.19 b	259.75 a	417.49 a	468.11 a
	4.3	54.69 a	180.47 a	321.24 a	421.07 a	422.29 a
Peso fresco en frutos (g planta ⁻¹)	2.6	9.57 ab	171.33 a	1,676.00 a	2,717.70 a	4,469.40 a
	3.5	17.66 a	191.31 a	1,005.50 b	2,841.70 a	4,649.20 a
	4.3	3.34 b	27.82 b	890.90 b	2,056.20 a	3,932.00 a
Peso fresco total (g planta ⁻¹)	2.6	160.69 a	583.64 a	2,613.70 a	3,764.40 a	5,715.00 a
	3.5	152.83 a	624.84 a	1,729.90 b	3,970.20 a	5,962.30 a
	4.3	163.12 a	540.93 a	1,804.50 b	3,213.80 a	5,194.20 a
Peso seco en hojas (g planta ⁻¹)	2.6	11.53 a	29.71 a	91.60 a	94.05 a	108.51 a
	3.5	10.59 a	28.23 a	49.62 b	90.43 a	95.49 ab
	4.3	11.08 a	31.90 a	71.63 ab	79.89 a	90.41 b
	2.6	4.93 a	16.92 a	47.78 a	64.78 a	69.28 a

Variables fisiológicas	Densidad (Plantas m ⁻²)	Etapa fenológica del cultivo de jitomate				
		Vegetativa (41 DDT)	Floración y cuaje de frutos (62 DDT)	Desarrollo de frutos (93 DDT)	Inicio de cosecha (114 DDT)	Fin de cosecha (156 DDT)
Peso seco en tallos (g planta ⁻¹)	3.5	4.79 a	15.93 a	31.90 b	62.34 ab	65.24 a
	4.3	4.71 a	17.36 a	39.25 b	51.90 b	53.85 b
Peso seco en frutos (g planta ⁻¹)	2.6	0.70 ab	11.34 a	113.03 a	113.42 a	238.31 a
	3.5	1.24 a	12.88 a	63.69 b	113.58 a	196.82 a
	4.3	0.23 b	2.02 b	60.38 b	93.33 a	177.56 a
Peso seco total (g planta ⁻¹)	2.6	17.16 a	57.97 a	252.41 a	272.25 a	416.10 a
	3.5	16.62 a	57.04 a	145.21 b	266.34 a	357.55 ab
	4.3	16.02 a	51.28 a	171.26 b	225.12 a	320.59 b

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DDT: Días después del trasplante.

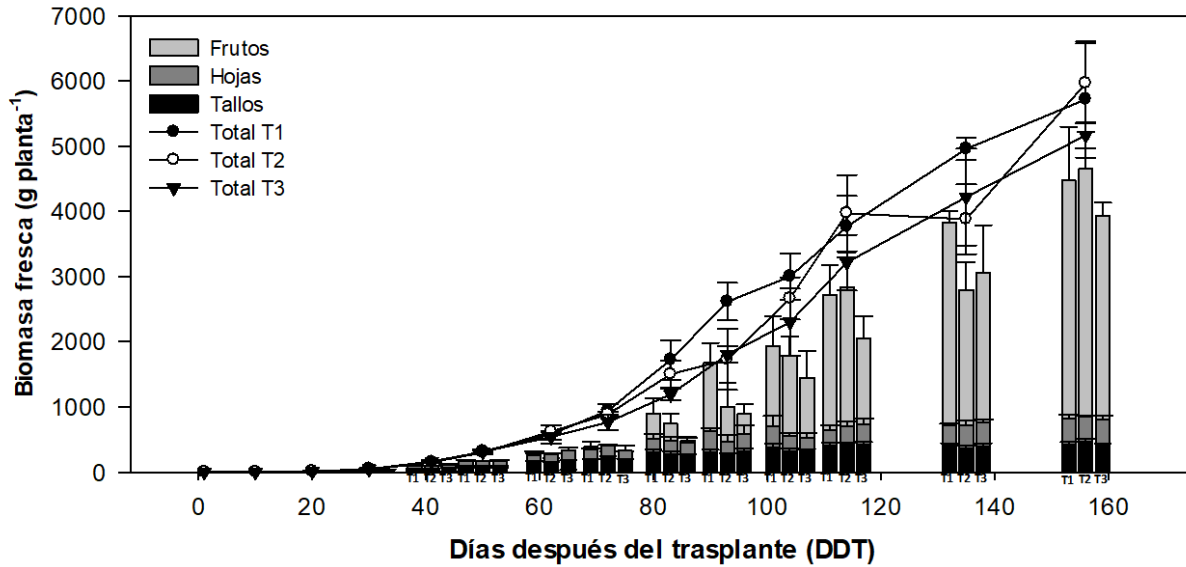


Figura 3. Biomasa fresca en hojas, tallos, frutos y total en cultivo de jitomate en diferentes densidades de plantación (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

En las tres primeras etapas (Cuadro 1), no se observan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para tallos y hojas, excepto en la etapa de floración y cuaje de fruto, donde el T3 presenta mayor peso en tallos respecto a T1 y T2. Por otro lado, los frutos presentaron diferencias estadísticas significativas en estas etapas; en las dos primeras etapas: vegetativa y floración, el T2 presentó mayor peso, debido a que en este tratamiento los frutos se desarrollaron más rápido que las otras dos densidades provocado por mayores niveles de radiación interceptada por el cultivo, lo que dio como resultado una mayor tasa fotosintética, mientras que, las dos últimas etapas (inicio y fin de cosecha), no se presentaron diferencias estadísticas significativas en todos los órganos para las diferentes densidades.

En general, se observó que, la biomasa de frutos incrementó al disminuir la biomasa de hojas y tallos (T1 y T2), tal como lo señala Galvez (2005), donde la primera fase es de crecimiento vegetativo, luego los frutos inician su desarrollo y los restantes órganos de la planta continúan su crecimiento desacelerado, de manera que, los frutos constituyen los principales órganos de mayor demanda que compiten entre ellos y con los órganos vegetativos por los asimilados disponibles. El mayor peso de biomasa fresca total resultó

para la densidad 2.6 plantas m⁻² al tener mejores condiciones de desarrollo, sin embargo, se observa que al final del ciclo la densidad 3.5 plantas m⁻² incrementa su valor tanto en hojas, tallo y frutos, debido al crecimiento indeterminado del cultivo, mostrando una producción continua de ramilletes florales y producción de frutos. El valor alcanzado por esta densidad, a los 156 DDT fue 5,962.3 g planta⁻¹, cercano a los valores encontrado por Juárez-Maldonado *et al.*, (2015), quienes trabajaron con jitomate híbrido "Caimán" de hábito de crecimiento indeterminado en la zona norte del país en una densidad de 3 plantas m⁻², obteniendo valores de 5,000 y 5,500 g planta⁻¹, para dos ciclos de cultivos.

1.6.4 Biomasa seca

En la Figura 4 se aprecia la dinámica de la biomasa seca en hojas, tallos y frutos, también se presenta la materia seca total, resultado de la suma de los pesos de los tres órganos. La tendencia mostrada en todos los tratamientos es similar al comportamiento de la biomasa fresca, pues en promedio, la biomasa fresca perdió entre 90% y 92 % de humedad al secarse. En las dos primeras etapas (Cuadro 1) no hay diferencias estadísticas entre tratamientos para tallos y hojas, sin embargo, en los frutos se presentan diferencias, resultando el T2 con la mayor biomasa. En la etapa 3 (desarrollo de fruto), se encuentran diferencias entre tratamientos para los tres órganos, y se observa como la densidad 2.6 plantas m⁻² va acumulando mayor biomasa seca respecto de los otros tratamientos. En las últimas etapas (inicio y fin de cosecha), el T1 sigue siendo significativo, presentado mayor biomasa en hojas y tallos, mientras que para los frutos no se encontraron diferencias estadísticas significativas. Por otro lado, analizando la biomasa seca total, se hallaron diferencias significativas en las etapas de desarrollo de fruto y fin de cosecha entre T1 y T3, pero ambos son estadísticamente iguales a T2.

En la biomasa seca total, el T1 muestra un crecimiento exponencial hasta los 83 DDT desacelerando su tasa de desarrollo a partir de esta etapa (desarrollo de frutos), después de los 93 DDT vuelve a tener un crecimiento lineal hasta los 120 DDT, posteriormente el desarrollo del cultivo tiende ligeramente a estabilizarse hasta finalizar el ciclo. Por otro lado, el T2 y T3 muestran un mismo crecimiento exponencial, desde el inicio hasta los 114 DDT y un crecimiento lineal hasta los 135 DDT. No obstante, el T2 presenta un incremento exponencial en el transcurso de la cosecha hasta llegar a su valor máximo,

contrario al T3 que mantiene su crecimiento lineal. Lo anterior indica que el cambio en el aumento de la biomasa seca en la etapa de cosecha está influenciado por la demanda de nutrimentos, características climáticas, así como la densidad de siembra.

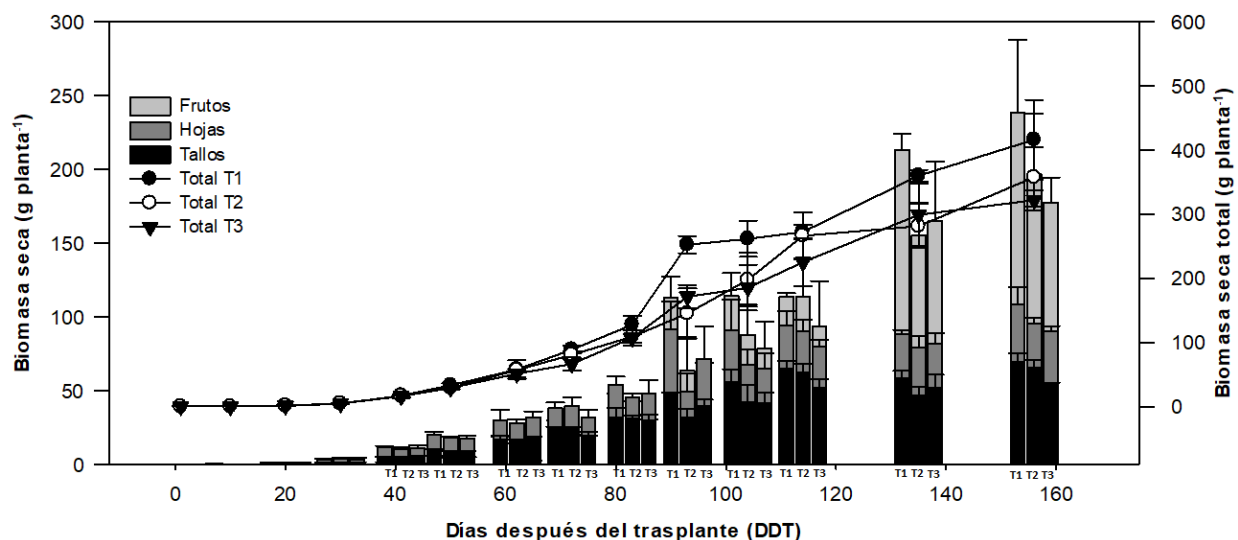


Figura 4. Biomasa seca en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

En cuanto a la partición de biomasa a los 156 DDT, la densidad 2.6 plantas m⁻² acumuló 416.10 g de materia seca total, de los cuales 26.08% son hojas, 16.65% tallos y 57.27% frutos. En la densidad 3.5 plantas m⁻² la acumulación de materia seca total fue de 357.55 g planta⁻¹ correspondientes a 26.71% hojas, 18.24% tallos y 55.05% en frutos. La densidad 4.3 plantas m⁻² resultó de un 28.20% en hojas, 16.80% tallos y 55.00% en frutos dando un total de 320.59 g planta⁻¹ de materia seca total. Estos resultados son similares a los obtenidos por Núñez-Ramírez *et al.*, (2012), quienes trabajaron con tomate tipo bola variedad cv. “Beatrice”, con producción a un tallo y una densidad de 3.8 plantas m⁻², y encontraron valores de 46% de producción de biomasa destinado para hojas y tallos, mientras que, el 54% restante para los frutos. Por otro lado, Vargas-Canales *et al.*, (2014), utilizaron el híbrido de jitomate saladette cv. “Rafaello” con una densidad de 4 plantas m⁻² y concluyeron que la materia seca, se encontró en mayor proporción hacia los frutos y en menor proporción hacia las hojas, confirmando los resultados obtenidos en esta investigación.

1.6.5 Absorción nutrimental

Las concentraciones obtenidas en las hojas, para cada nutrimento (no mostrados), se encuentran dentro de los intervalos óptimos para jitomate reportados por Llanderal *et al.* (2018) indicando buen abastecimiento nutrimental, además las plantas no presentaron síntomas visibles de deficiencia nutrimental. La extracción de macronutrientes en orden decreciente fue: $K > N > Ca > Mg > P$, para los tres tratamientos, esta secuencia coincide con lo reportado por Vargas-Canales *et al.*, (2014), excepto por Mg y P, en las que se obtuvo mayor concentración de Mg respecto al fósforo en este trabajo.

Nitrógeno. La acumulación de nutrimentos guarda relación con la biomasa de cada órgano, a mayor biomasa mayor acumulación. En este sentido, el N se acumuló mayormente en frutos, seguido de hojas y tallos (Figura 5). Hernández *et al.* (2009) señalan que la mayor extracción por parte de los frutos coincide con la alta demanda metabólica que ejercen en la planta durante su etapa de rápido crecimiento.

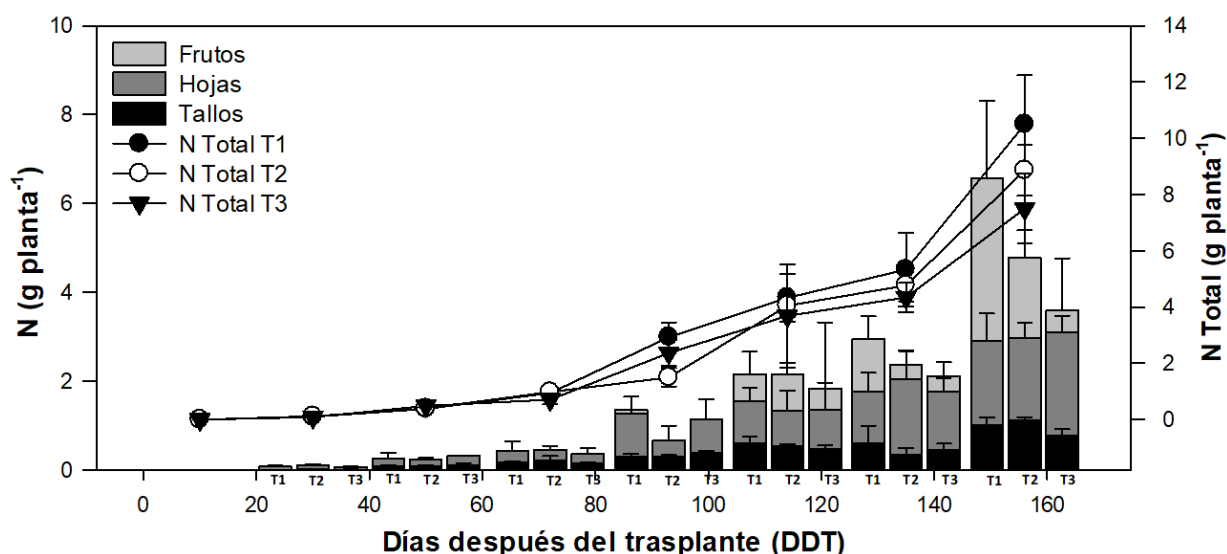


Figura 5. Nitrógeno acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total en jitomate en diferentes densidades (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

Se observa, para los tres órganos, una baja demanda de N en los primeros 60 DDT que corresponden a la etapa vegetativa, posteriormente incrementa en las etapas de crecimiento y desarrollo de follaje, inflorescencias y frutos, cuando las exigencias de N

son altas (Nuez, 1995). Este comportamiento coincide con lo indicado por Pineda-Pineda *et al.*, (2011), quienes reportan una baja demanda nutrimental en jitomate durante los primeros 40 DDT, sin embargo, después de esta fecha las plantas recuperaron más del 90% del N suministrado. Para las hojas, en todas las etapas, no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Cuadro 2). Por el contrario, el T2 fue significativo en la última etapa, respecto de los demás tratamientos para acumulación en tallos, debiéndose a que en este tratamiento hubo mayores niveles de radiación interceptada por el cultivo, lo que dio como resultado una mayor tasa fotosintética, obteniendo mayor acumulación de biomasa y, por tanto, mayor acumulación de N. En el caso de los frutos, se presentaron diferencias estadísticas significativas en tres etapas: vegetativa, desarrollo de fruto y fin de cosecha; en estas últimas dos etapas el T1 acumuló mayor N respecto al T2 y T3, esto mismo sucedió con la acumulación total, donde las únicas etapas que presentaron diferencias estadísticas fueron desarrollo de fruto y fin de cosecha.

La acumulación total obtenida, para la densidad 4.3 plantas m^{-2} , fue de 7.50 g planta $^{-1}$, similar a lo obtenido por Vargas-Canales *et al.*, (2014), quienes trabajaron un tallo por planta a una densidad de 4 plantas m^{-2} , utilizando tezontle como sustrato y obtuvieron un valor de 7.5 g planta $^{-1}$ a los 140 DDT. Velasco-Alvarado *et al.*, (2016), también trabajaron con tezontle en un sistema de producción a dos tallos, pero a una densidad de 2.5 plantas m^{-2} , y obtuvieron valores de 1.01, 3.43 y 11.03 g planta $^{-1}$, a los 45, 90 y 150 DDT, respectivamente. Estos valores son ligeramente mayores a los obtenidos en esta investigación para la densidad 2.6 plantas m^{-2} .

Fósforo. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del fósforo, al igual que el nitrógeno, este se acumuló mayormente en frutos, luego en hojas y por último en tallos, también muestra que en los primeros 60 DDT la demanda de P es baja (etapa vegetativa), posteriormente incrementa en las etapas de floración y desarrollo de frutos, esta tendencia coincide con lo reportado por Betancourt & Pierre (2013). En el Cuadro 2 se muestra el análisis estadístico, obteniendo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para todas las etapas, excepto para tallos y hojas en la etapa vegetativa y frutos en la etapa de fin de cosecha. En la etapa de desarrollo de frutos se observa que

tanto para hojas y tallos, el T3 presenta mayor acumulación de fósforo, mientras que en frutos lo es para el T1, esto indica que, al incrementar la acumulación en tallos y hojas, se reduce la acumulación en frutos y viceversa. En la absorción total de este elemento, se presentan diferencias estadísticas significativas en las tres últimas etapas, siendo el T3 con mayor acumulación en la etapa de desarrollo de frutos y fin de cosecha, debido a que en este tratamiento se presenta un crecimiento más lento, pero al final del ciclo aceleró el crecimiento de las plantas, manifestándose mayor biomasa y, por tanto, mayor acumulación de fósforo.

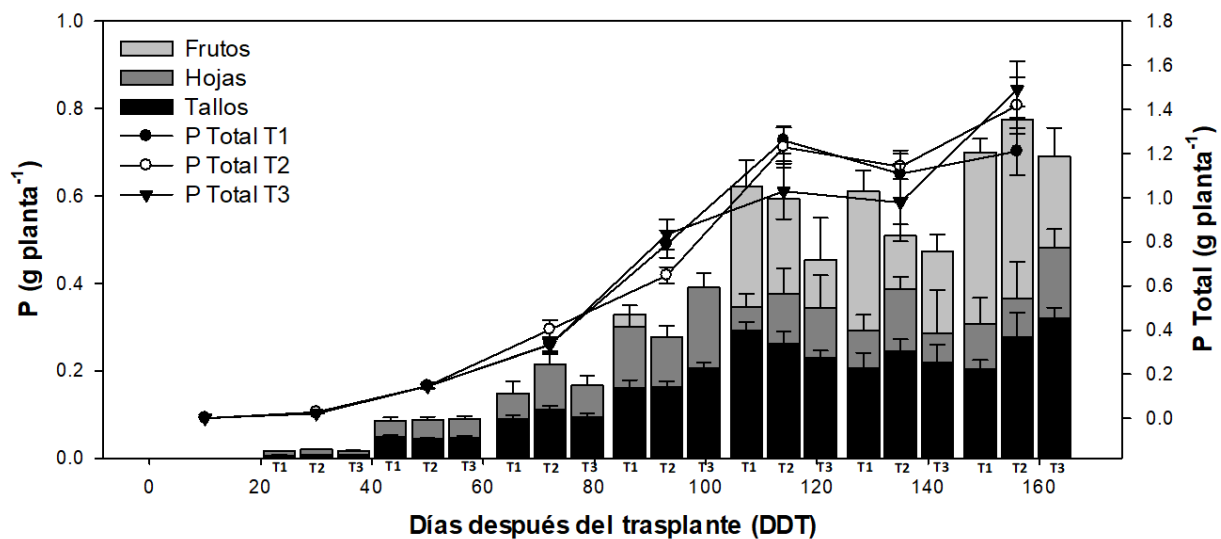


Figura 6. Fósforo acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total en jitomate en diferentes densidades (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

La acumulación de fósforo total obtenido fue de 1.21, 1.42 y 1.49 g planta⁻¹, para T1, T2 y T3, respectivamente. Estos resultados son más bajos a los reportados por Vargas-Canales *et al.*, (2014), quienes trabajaron con una densidad de 4 plantas m⁻², y encontraron un valor de 2.6 g planta⁻¹ a los 140 DDT. Mientras que Velasco-Alvarado *et al.*, (2016), obtuvieron valores de 0.25, 1.46 y 6.02 g planta⁻¹, a los 45, 90 y 150 DDT, respectivamente. Ambas investigaciones utilizaron “tezontle” como sustrato, por lo que pudo ser un factor importante al evitar las pérdidas por lixiviación, en comparación al “tepetzil”, utilizado en este estudio.

Cuadro 2. Comparación de la acumulación de nitrógeno y fósforo por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero.

Nutrimentos (g planta ⁻¹)	Densidad (Plantas m ⁻²)	Etapa fenológica del cultivo de jitomate				
		Vegetativa (50 DDT)	Floración y cuaje de frutos (72 DDT)	Desarrollo de frutos (93 DDT)	Inicio de cosecha (114 DDT)	Fin de cosecha (156 DDT)
Nitrógeno (hojas)	2.6	0.26 a	0.45 a	1.27 a	1.55 a	2.90 a
	3.5	0.24 a	0.47 a	0.67 a	1.35 a	2.97 a
	4.3	0.33 a	0.37 a	1.14 a	1.37 a	3.11 a
Nitrógeno (tallos)	2.6	0.08 a	0.18 a	0.31 a	0.61 a	1.03 ab
	3.5	0.10 a	0.23 a	0.30 a	0.54 a	1.12 a
	4.3	0.12 a	0.16 a	0.39 a	0.47 a	0.78 b
Nitrógeno (frutos)	2.6	0.04 b	0.32 a	1.35 a	2.16 a	6.56 a
	3.5	0.06 a	0.30 a	0.53 b	2.15 a	4.78 ab
	4.3	0.04 b	0.19 a	0.84 b	1.85 a	3.60 b
Nitrógeno (total)	2.6	0.39 a	0.95 a	2.93 a	4.33 a	10.49 a
	3.5	0.40 a	0.99 a	1.50 b	4.05 a	8.86 ab
	4.3	0.49 a	0.71 a	2.37 ab	3.69 a	7.50 b
Fósforo (hojas)	2.6	0.09 a	0.15 b	0.30 b	0.34 a	0.31 b
	3.5	0.09 a	0.22 a	0.28 b	0.37 a	0.37 ab
	4.3	0.09 a	0.17 ab	0.39 a	0.34 a	0.48 a
Fósforo (tallos)	2.6	0.05 a	0.09 b	0.16 b	0.29 a	0.20 b
	3.5	0.04 a	0.11 a	0.16 b	0.26 ab	0.28 ab
	4.3	0.05 a	0.09 b	0.21 a	0.23 b	0.32 a
Fósforo (frutos)	2.6	0.01 b	0.10 a	0.33 a	0.62 a	0.70 a
	3.5	0.02 a	0.08 b	0.21 b	0.59 ab	0.77 a
	4.3	0.01 c	0.07 b	0.24 b	0.45 b	0.69 a
Fósforo (total)	2.6	0.15 a	0.34 a	0.79 a	1.26 a	1.21 b
	3.5	0.15 a	0.40 a	0.65 b	1.23 a	1.42 ab
	4.3	0.15 a	0.33 a	0.83 a	1.03 b	1.49 a

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DDT: Días después del trasplante.

Potasio. Este elemento al igual que el N y P, se acumuló mayormente en frutos, luego en hoja y por último en tallos (Figura 7), en los primeros 60 DDT, correspondiente a la etapa vegetativa, la demanda de K es baja posteriormente incrementa en las etapas de

floración y desarrollo de frutos, debido a que es determinante para el crecimiento y desarrollo de fruto (Marschner, 2012). Este comportamiento coincide con lo encontrado por Betancourt & Pierre (2013), donde el incremento de K se hizo evidente en la formación de frutos hasta la época de cosecha. En la etapa vegetativa y desarrollo del fruto, se encontraron diferencias estadísticas significativas para las hojas (Cuadro 3), donde el T3 presentó mayor acumulación de K. Por otro lado, los tallos mostraron diferencias en todas las etapas, excepto en inicio de cosecha, siendo el T2 con mayor acumulación de K. En los frutos se observa mayor acumulación en T1, por lo que es estadísticamente significativo en la mayoría de las etapas (Cuadro 3). En cuanto a la acumulación total, se encontraron diferencias en la etapa vegetativa y en desarrollo de frutos, y se observa que el T1 acumula mayor cantidad de K en las últimas tres etapas.

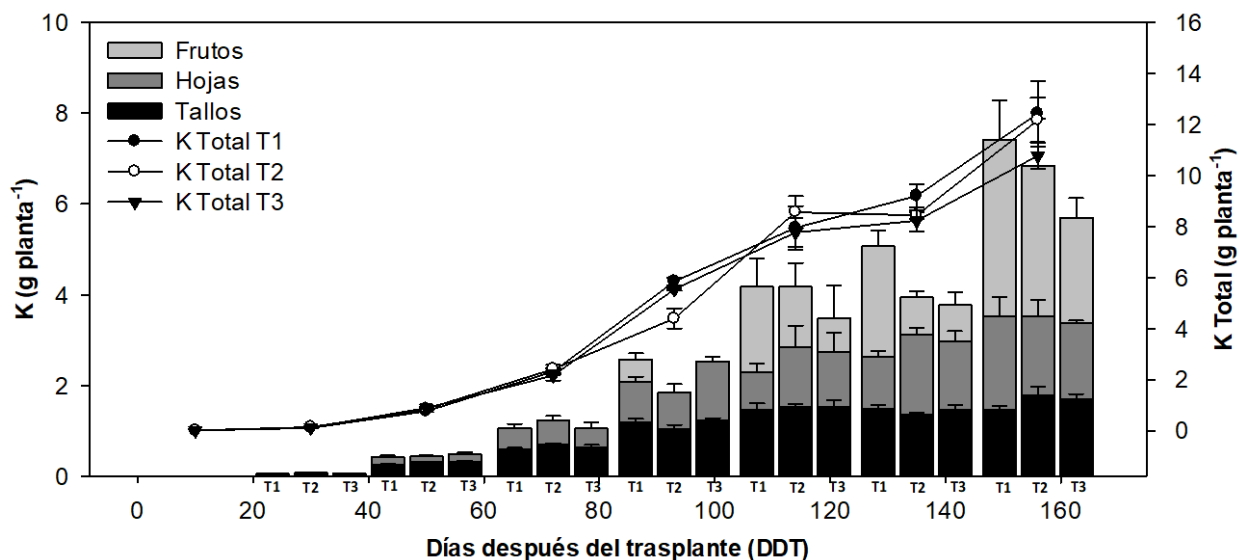


Figura 7. Potasio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

Los valores totales obtenidos a los 156 DDT fueron 12.42, 12.17 y 10.78 g planta⁻¹, para T1, T2 y T3, respectivamente. Estos valores son menores a los obtenidos por Vargas-Canales *et al.*, (2014), quienes encontraron un valor de 15 g planta⁻¹ a los 140 DDT en una densidad de 4 plantas m⁻². No obstante, Velasco-Alvarado *et al.*, (2016), encontraron valores menores de 0.42, 2.91 y 8.61 g planta⁻¹ para 45, 90 y 150 DDT, en un sistema de producción a dos tallos y una densidad de 2.5 plantas m⁻². Gandica & Peña (2015),

encontraron resultados de $5.47 \text{ g planta}^{-1}$ para el cultivar L2 y $6.43 \text{ g planta}^{-1}$ para el cultivar L3, a los 88 DDT, a una densidad de $2.3 \text{ plantas m}^{-2}$, similares a lo obtenido en esta investigación para el T1.

Calcio. En la Figura 8 se muestra la acumulación de calcio en hojas, tallos, frutos y el total, se aprecia que, después de los 60 DDT hay mayor demanda del cultivo en las etapas de floración, desarrollo de frutos y cosecha. No obstante, contrario al N, P y K, la mayor acumulación de Ca se encuentra en las hojas, seguido de los tallos y por último los frutos, esto se explica por su baja movilidad en la planta (Betancourt y Pierre., 2013), pues el Ca tiene poca movilidad en el floema, transportándose en la planta básicamente a través del xilema (Malone *et al.*, 2002). Por lo tanto, los órganos de rápida transpiración como las hojas maduras, acumulan altas cantidades de Ca, mientras que los órganos de baja transpiración, como el fruto, acumulan poco (Passam *et al.*, 2007).

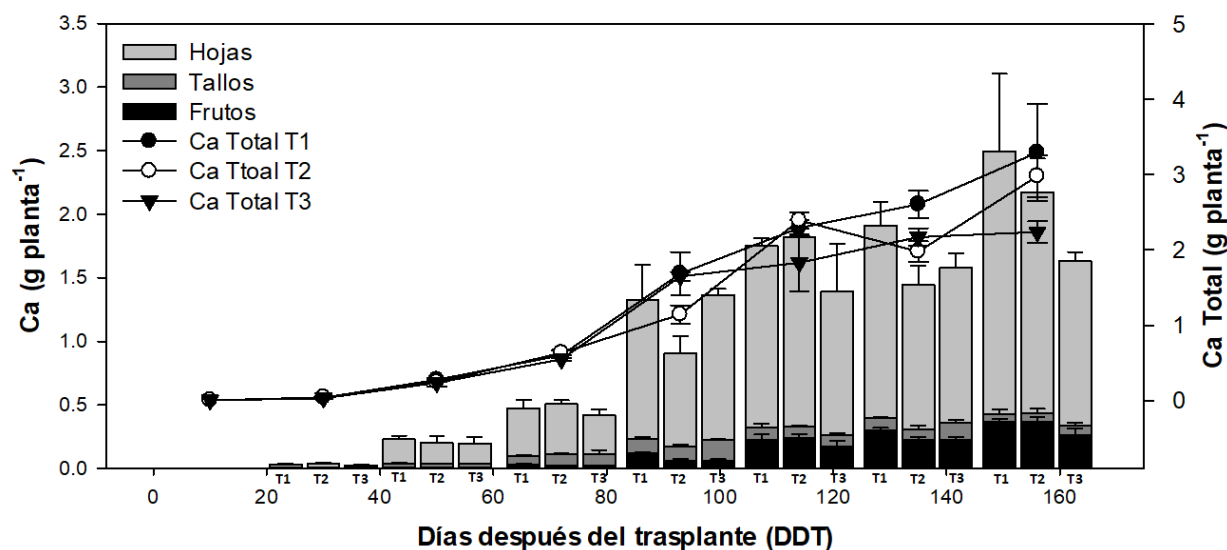


Figura 8. Calcio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades (T1= $2.6 \text{ plantas m}^{-2}$; T2= $3.5 \text{ plantas m}^{-2}$; T3= $4.3 \text{ plantas m}^{-2}$; las barras verticales indican el error estándar).

Cuadro 3. Comparación de la acumulación de potasio y calcio por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero.

Nutrimentos (g planta ⁻¹)	Densidad (Plantas m ⁻²)	Etapa fenológica del cultivo de jitomate				
		Vegetativa (50 DDT)	Floración y cuaje de frutos (72 DDT)	Desarrollo de frutos (93 DDT)	Inicio de cosecha (114 DDT)	Fin de cosecha (156 DDT)
Potasio (hojas)	2.6	0.43 b	1.07 a	2.07 b	2.30 a	3.52 a
	3.5	0.44 b	1.24 a	1.85 b	2.85 a	3.53 a
	4.3	0.50 a	1.06 a	2.54 a	2.75 a	3.38 a
Potasio (tallos)	2.6	0.26 b	0.60 b	1.19 a	1.47 a	1.48 b
	3.5	0.31 a	0.69 a	1.04 b	1.53 a	1.79 a
	4.3	0.32 a	0.63 ab	1.23 a	1.53 a	1.69 ab
Potasio (frutos)	2.6	0.07 b	0.65 a	2.58 a	4.18 a	7.42 a
	3.5	0.09 a	0.48 b	1.50 b	4.18 a	6.85 a
	4.3	0.06 c	0.47 b	1.76 b	3.49 a	5.70 a
Potasio (total)	2.6	0.76 b	2.31 a	5.85 a	7.95 a	12.42 a
	3.5	0.84 a	2.41 a	4.39 b	8.56 a	12.17 a
	4.3	0.88 a	2.16 a	5.53 a	7.77 a	10.78 a
Calcio (hojas)	2.6	0.23 a	0.48 a	1.33 a	1.75 a	2.50 a
	3.5	0.20 a	0.51 a	0.91 b	1.82 a	2.17 a
	4.3	0.20 a	0.42 a	1.36 a	1.39 a	1.63 a
Calcio (tallos)	2.6	0.04 a	0.10 a	0.23 a	0.32 a	0.42 a
	3.5	0.04 a	0.11 a	0.17 b	0.33 a	0.44 a
	4.3	0.04 a	0.11 a	0.22 a	0.26 b	0.34 b
Calcio (frutos)	2.6	0.003 a	0.028 a	0.121 a	0.222 a	0.368 a
	3.5	0.004 a	0.018 a	0.061 b	0.236 a	0.370 a
	4.3	0.002 b	0.018 a	0.063 b	0.173 a	0.265 b
Calcio (total)	2.6	0.27 a	0.60 a	0.60 a	2.29 ab	3.29 a
	3.5	0.24 a	0.63 a	0.63 a	2.39 a	2.98 ab
	4.3	0.23 a	0.55 a	0.55 a	1.83 b	2.24 b

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$); DDT: Días después del trasplante.

La acumulación del Ca en hojas, no presentaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, excepto en el desarrollo de frutos, donde el T2, presento una menor acumulación respecto de los otros tratamientos (Cuadro 3). En el caso de los tallos, se presentaron diferencias en las tres últimas etapas, donde los mejores tratamientos fueron

T1 y T2, mientras que en los frutos se presentaron diferencias en tres etapas (vegetativa, desarrollo de frutos y fin de cosecha), siendo el T3 el tratamiento con menor acumulación de Ca. En la absorción total del Ca, se obtuvieron valores de 3.29, 2.98 y 2.24 g planta⁻¹, presentando diferencias estadísticas entre T1 y T3, pero no con T2. Estos valores son menores a los reportados por Vargas-Canales *et al.*, (2014) y Velasco-Alvarado *et al.*, (2016), quienes reportan valores de 6.5 y 13.45 g planta⁻¹, respectivamente. No obstante, Betancourt y Pierre., (2013), reportan valores similares de 2.55 g planta⁻¹, estas diferencias pueden deberse principalmente a la variedad y las condiciones climáticas donde fueron cultivados.

Magnesio. En la figura 9, se muestra la acumulación de magnesio en hojas, tallos, frutos y total. Al igual que los nutrimentos descritos, la acumulación de Mg comienza a partir de los 60 DDT, cuando se empieza a desarrollar flores y frutos hasta llegar a la cosecha (Marschner, 2012) y a diferencia del Ca, se observa mayor acumulación en hojas, luego en frutos y por último en tallos, debido a que presenta movilidad en la planta, además forma parte de la molécula de clorofila (Juárez-Maldonado *et al.*, 2017), lo que explica mayor concentración de este elemento en las hojas.

Para este elemento, se presentaron diferencias estadísticas significativas en todos los tratamientos para todas las etapas (Cuadro 4), excepto en la etapa desarrollo de frutos (en hojas) e inicio de cosecha (en frutos). En general, el T1 y T2 manifestaron mayor acumulación de Mg en todos los órganos, lo mismo sucede con la acumulación total para todas las etapas, excepto en fin de cosecha, donde se aprecia la marcada diferencia entre los tres tratamientos, acumulándose mayor cantidad de Mg en el T1. Estos valores encontrados son 1.550, 1.281 y 0.911 g planta⁻¹, para T1, T2 y T3, respectivamente. Similarmente, Vargas-Canales *et al.*, (2014), obtuvieron 1.5 g planta⁻¹ para una densidad de 4 plantas m⁻². Por otro lado, Velasco-Alvarado *et al.*, (2016), encontraron valores de 0.46, 1.33, 4,38 g planta⁻¹, correspondientes a 45, 90 y 150 DDT, valores mayores a los obtenidos en esta investigación.

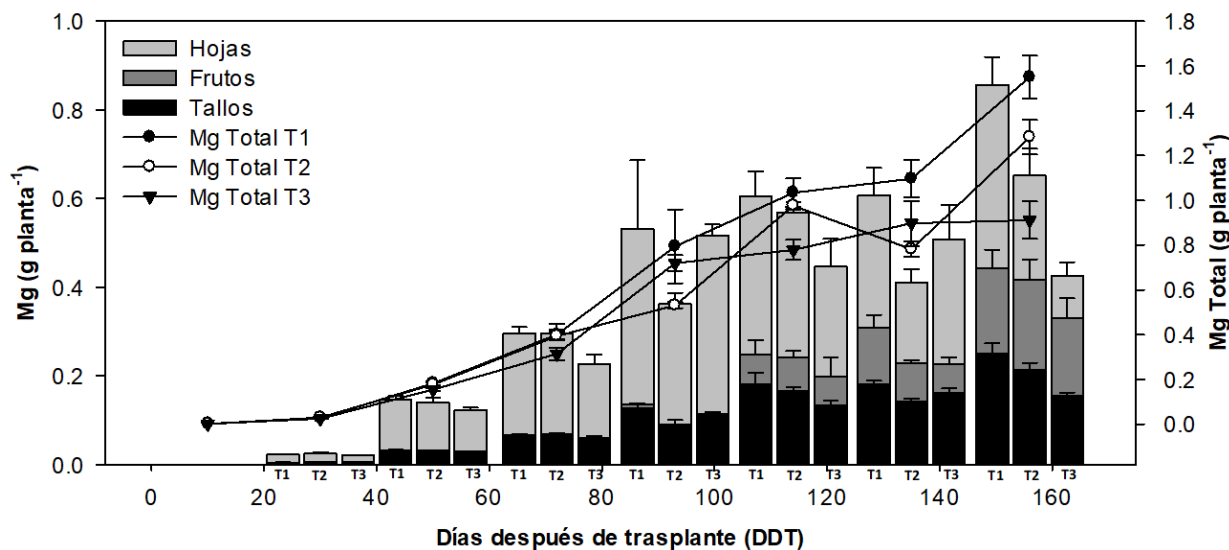


Figura 9. Magnesio acumulado en hojas, tallos, frutos y acumulación total de jitomate en diferentes densidades (T1=2.6 plantas m⁻²; T2=3.5 plantas m⁻²; T3= 4.3 plantas m⁻²; las barras verticales indican el error estándar).

Cuadro 4. Comparación de la acumulación de magnesio por órganos y total en tres densidades de jitomate hidropónico en invernadero

Nutrientes (g planta ⁻¹)	Densidad (Plantas m ⁻²)	Etapa fenológica del cultivo de jitomate				
		Vegetativa (50 DDT)	Floración y cuaje de frutos (72 DDT)	Desarrollo de frutos (93 DDT)	Inicio de cosecha (114 DDT)	Fin de cosecha (156 DDT)
Magnesio (hojas)	2.6	0.146 a	0.295 a	0.531 a	0.604 a	0.857 a
	3.5	0.140 a	0.296 a	0.362 a	0.567 a	0.653 b
	4.3	0.123 b	0.226 b	0.515 a	0.446 b	0.424 c
Magnesio (tallos)	2.6	0.032 a	0.065 ab	0.126 a	0.182 a	0.250 a
	3.5	0.032 ab	0.068 a	0.091 b	0.166 a	0.213 b
	4.3	0.029 b	0.060 b	0.114 a	0.133 b	0.156 c
Magnesio (frutos)	2.6	0.004 b	0.040 a	0.136 a	0.247 a	0.444 a
	3.5	0.005 a	0.029 b	0.077 b	0.242 a	0.416 ab
	4.3	0.003 b	0.028 b	0.090 b	0.199 a	0.330 b
Magnesio (total)	2.6	0.183 a	0.401 a	0.794 a	1.033 a	1.550 a
	3.5	0.177 a	0.394 a	0.531 b	0.976 a	1.281 b
	4.3	0.155 b	0.314 b	0.719 ab	0.778 b	0.911 c

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, p≤0.05)

1.6.6 Transpiración

Los valores de transpiración de las dos primeras semanas, para los tres tratamientos, son menores a 0.5 L m^{-2} (Figura 10), no obstante, el volumen transpirado fue aumentando conforme crecieron las plantas, en los días de mayor demanda alcanzó valores de 3.26, 4.38 y 5.24 L m^{-2} , para el T1, T2 y T3, respectivamente. Estos valores son mayores a los reportados por Flores *et al.*, (2007) y Segura *et al.*, (2011), quienes encontraron valores de 1.5 L m^{-2} , incluso en las etapas de mayor demanda. Por otro lado, Castillo *et al.*, (2014) hallaron valores mayores de 400 L m^{-2} en la época de mayor demanda, a una densidad de 6 plantas m^{-2} , y con crecimiento determinado. El consumo total de agua acumulada en el ciclo de vida del cultivo fue de 255.70 L m^{-2} para T1, 289.18 L m^{-2} para T2 y 356.25 L m^{-2} para T3. El alto valor de la transpiración medido en la densidad 4.3 plantas m^{-2} se atribuye al poseer mayor cantidad de área foliar que la densidad 2.5 y 3.5 plantas m^{-2} , por ende, el consumo es mucho mayor.

La radiación solar, es una de las variables climáticas que más influyen en el crecimiento del cultivo de jitomate y la que mejor se correlaciona con la transpiración (Figura 11), cuando mayor radiación global recibe el cultivo, la transpiración aumenta y cuando la radiación disminuye la transpiración también se reduce, pues se trata del factor que suministra la energía al proceso de intercambio y balance de energía. Martínez-Ruiz *et al.*, (2019), mencionan que bajo nivel de radiación y temperatura afectan la reducción de la producción de materia seca, la absorción de nutrimentos como el N y reduce el índice de área foliar, mientras que valores altos de radiación y de humedad relativa reducen la presión de vapor, lo que afecta directamente a la evapotranspiración.

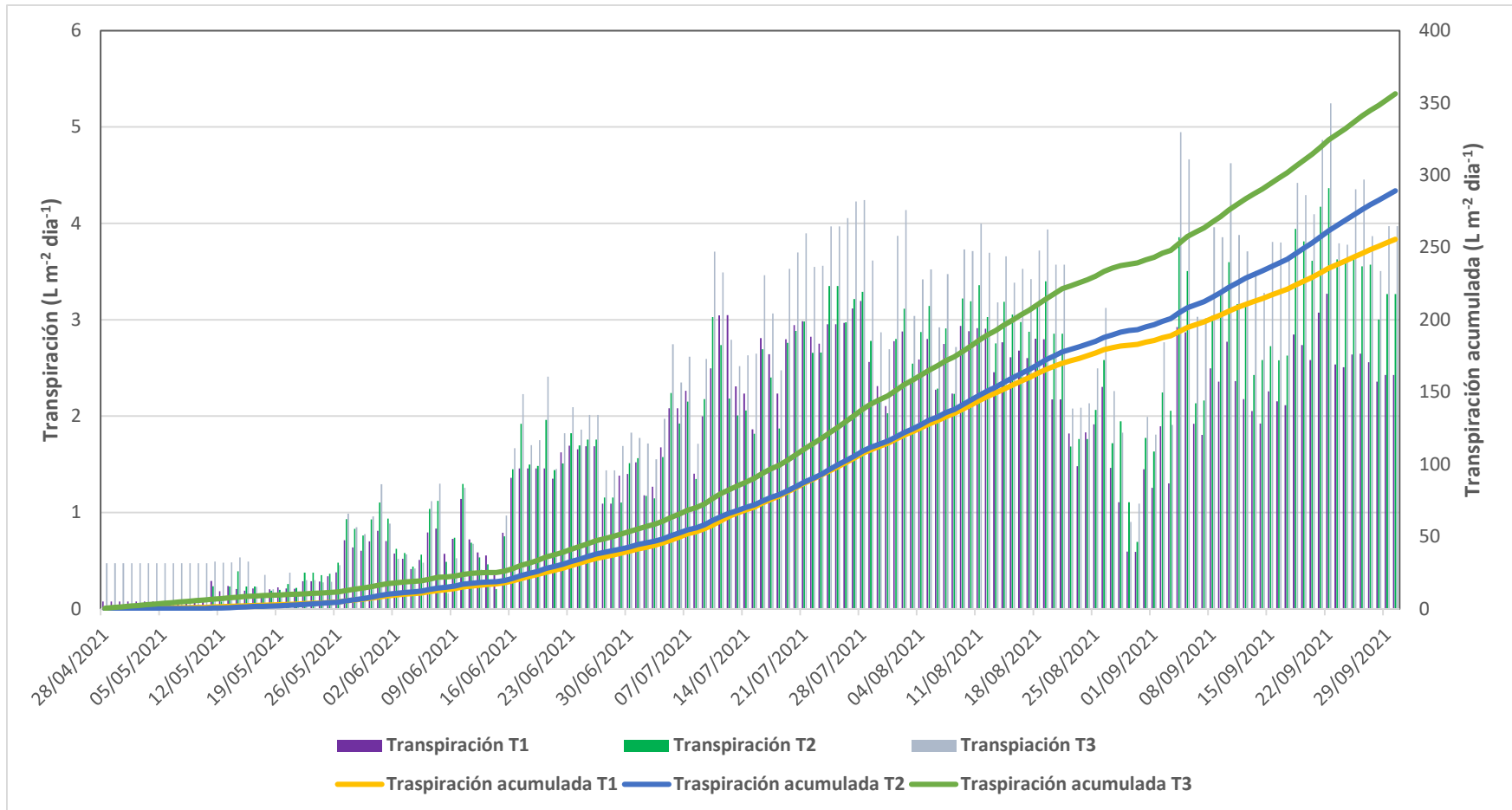


Figura 10. Transpiración instantánea y transpiración acumulada del cultivo de jitomate en tres densidades: 2.6 plantas m^{-2} (T1), 3.5 plantas m^{-2} (T2) y 4.3 plantas m^{-2} (T3).

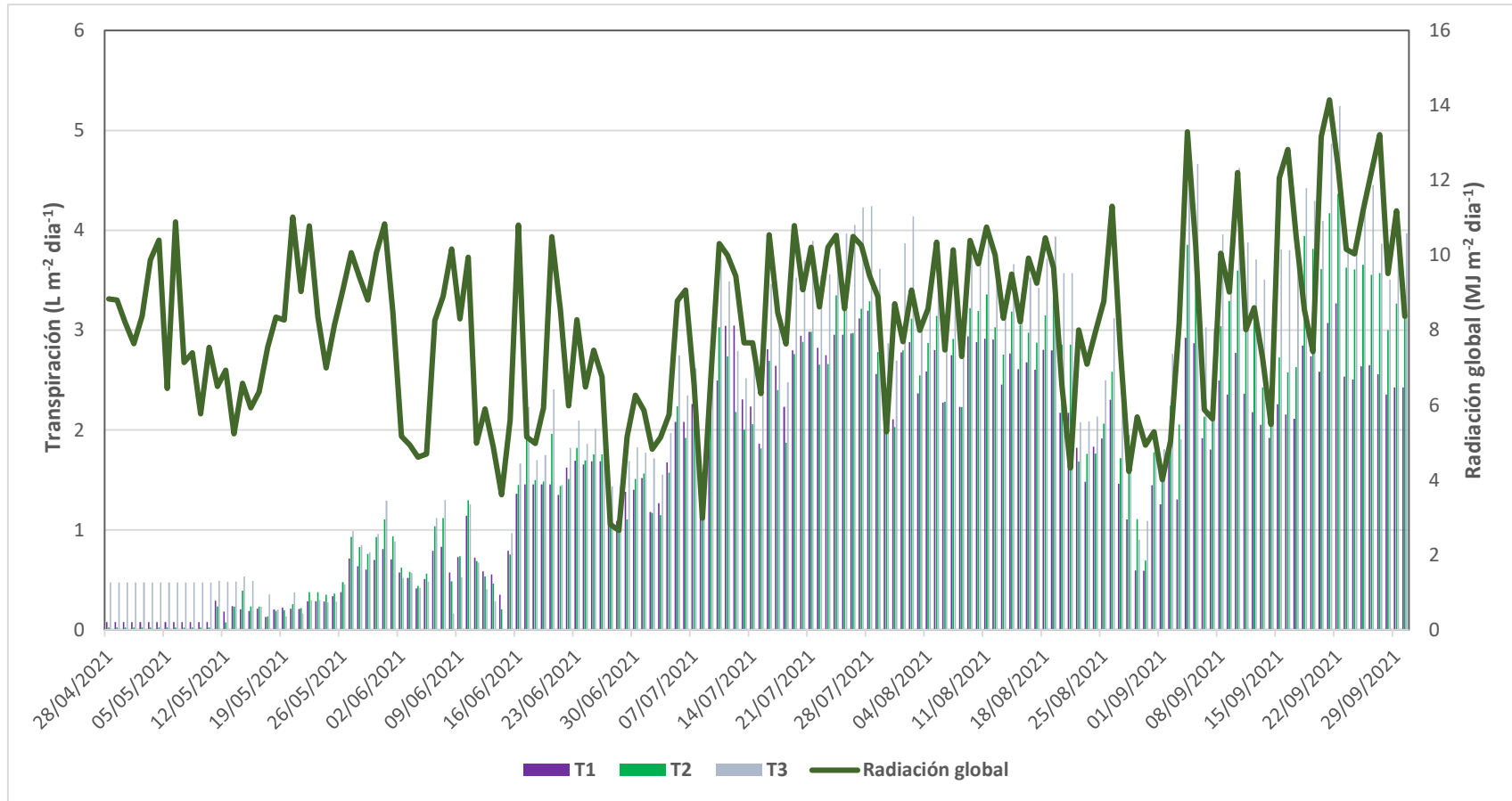


Figura 11. Comportamiento de la transpiración del cultivo de jitomate respecto a la radiación global en tres densidades: 2.6 plantas m^{-2} (T1), 3.5 plantas m^{-2} (T2) y 4.3 plantas m^{-2} (T3).

1.6.7 Rendimiento

Durante el ciclo del experimento se realizaron nueve cortes de frutos, los cuales se sumaron para obtener el rendimiento de cada uno de los tratamientos. Analizando el rendimiento por planta, se observa que el T1 presenta un valor de 5.69 kg planta⁻¹ (Cuadro 5), siendo estadísticamente diferente a T2 y T3, obteniendo valores de 4.79 y 4.63 kg planta⁻¹, respectivamente. Mendoza-Pérez *et al.*, (2018), encontraron valores de 5.91 kg planta⁻¹ a una densidad de 3 plantas m⁻², en un sistema de producción a dos tallos, mientras que Vargas-Canales *et al.*, (2014), obtuvieron valores de 5.22 kg planta⁻¹ a una densidad de 4 plantas m⁻². Estos valores son mayores a los encontrados en este trabajo para el T2 y T3, pero son parecidos a lo obtenido en el tratamiento T1.

En los resultados analizados en kg m⁻², se obtuvieron valores de 14.79, 16.77 y 19.91 kg m⁻², para T1, T2 y T3, respectivamente. Nótese que se presentan diferencias estadísticas significativas en todos los tratamientos, por tanto, la densidad es un factor importante que afecta el rendimiento total en el cultivo de jitomate. Estos resultados son similares a los reportados por Flores *et al.* (2007), quienes obtuvieron un valor de 20 kg m⁻² en densidad de plantación de 4.3 plantas m⁻²; por otro lado, Rincón *et al.*, (2005) reportan valores de 19.9 kg m² a una densidad de 2 plantas m⁻².

1.6.8 Productividad de agua

En el Cuadro 5, también se muestra el uso del agua por el producto (UAP; PWU, por sus siglas en inglés) y se define como el volumen de agua utilizado por la planta durante todo el ciclo productivo para generar un kilogramo de producto fresco (L kg⁻¹) (Salazar *et al.*, 2020). La productividad para cada densidad, tomando en cuenta el agua consumida durante todo el ciclo para producir los kilogramos de rendimiento son: 21.49, 22.14 y 22.50 L kg⁻¹ para T1, T2 y T3, respectivamente. Estos resultados son menores a lo reportado por Salazar *et al.*, (2020) y Flores *et al.* (2007), quienes reportan valores de 35.89 L kg⁻¹ y 30.7 L kg⁻¹, respectivamente.

Cuadro 5. Productividad del agua (UAP) de fruto fresco durante el ciclo del cultivo de jitomate.

Densidad (plantas m ⁻²)	Agua total consumida (L m ⁻²)	Rendimiento (kg planta ⁻¹)	Transpiración adicional (L m ⁻²)	Transpiración por planta (L planta ⁻¹)	Rendimiento (kg m ⁻²)	GR ^γ	Productividad (L kg ⁻¹)
2.6	317.79c	5.69a	---	122.2a	14.79c	---	21.49a
3.5	371.35b	4.79b	53.6	106.1b	16.77b	2.0	22.14a
4.3	447.88a	4.63b	130.1	104.2b	19.91a	5.1	22.50a

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$); ^γGR = ganancia en rendimiento (kg m²) respecto a D1.

Salazar *et al.* (2014) señalan que para producir 1 kg de jitomate en invernaderos de plástico sin calefacción se necesitan de 30 a 40 litros de agua en países como Israel y España, solo en invernaderos de cristal con un control avanzado se necesita 22 litros de agua. Por lo que los resultados encontrados en esta investigación son datos alentadores, en el marco de hacer un uso más eficiente del agua.

1.7 CONCLUSIONES

En las primeras etapas, las hojas y tallos son los órganos que más materia fresca y seca acumularon en la planta, y en las etapas finales del cultivo los mayores aportes corresponden a las hojas y frutos. La densidad 2.6 plantas m^{-2} , obtuvo valores inferiores en área foliar e índice de área foliar; sin embargo, presentó un aumento en biomasa fresca, seca y, por tanto, en rendimiento por planta. No obstante, en el rendimiento expresado en kilogramos por superficie, la densidad 4.3 plantas m^{-2} aumentó de manera considerable la producción en comparación con los otros dos tratamientos, es decir, 11.44 % y 25.9 % superior a la densidad 3.5 y 2.6 plantas m^{-2} , respectivamente.

En general, la densidad 2.6 plantas m^{-2} , presentó la mayor extracción por planta, seguido de la densidad 3.5 y 4.3 plantas m^{-2} . Se presenta una dinámica de absorción compleja, por lo cual se recomienda fraccionar las aplicaciones tomando en cuenta los momentos de mayor absorción para el uso racional de los recursos en el programa de fertilización.

El mayor consumo total de agua acumulada, expresada en litros por superficie, lo presentó la densidad 4.3 plantas m^{-2} , así como también su productividad ($L\ kg^{-1}$). Seguido de la densidad 3.5 y 2.6 plantas m^{-2} .

La información presentada aquí puede ser útil en la planeación de los requerimientos de agua y nutrientes a lo largo de un ciclo de cultivo, así como definir épocas de producción para aprovechar los mejores precios del mercado. Además, se puede aplicar en áreas poco exploradas como la modelación y simulación de jitomate cultivado en invernadero.

CAPÍTULO II. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HORTSYST EN JITOMATE EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN A DOS TALLOS EN INVERNADERO

2.1 RESUMEN

En esta investigación se evaluó la calibración y validación del modelo HORTSYST, un modelo dinámico de crecimiento para jitomate en invernadero, el cual tiene como variables de estado la producción de biomasa seca, el tiempo-térmico, absorción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, y magnesio, y como variables de salida: la transpiración del cultivo e índice de área foliar. Las variables de entrada del modelo son mediciones horarias de temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (HR, %) y la radiación solar global (W m^{-2}); cuenta con 24 parámetros de los cuales se estiman 14. Se establecieron dos experimentos con jitomate hidropónico tipo saladette, a dos tallos por plantas, ciclo primavera-verano con densidad de 3.5 plantas m^{-2} . El primer experimento, para calibración, variedad “*Cid F1*” se trasplantó el 24 de abril del 2016, en la Universidad Autónoma Chapingo y se empleó “tezontle” como sustrato. El segundo experimento, para validación, se realizó en las instalaciones del INIFAP Campo Experimental San Martinito, Puebla, variedad cv. “*Moctezuma F1*”, se trasplantó el 24 de abril de 2021, utilizando “tepetzil” como sustrato. Para la evaluación, se emplearon los siguientes estadísticos: sesgo (*BIAS*), raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*), eficiencia de modelado (*EF*) y coeficiente de determinación (R^2). En la calibración todas las variables simuladas tuvieron una *EF* y R^2 mayores que 95%, mientras que en la validación la mayoría resultó superior de 80%, excepto para P_{up} , que presentó una *EF* de 48%, valores estadísticamente aceptables. El rendimiento del modelo resultó eficiente tanto en calibración como en validación.

Palabras clave: piedra pómez; *Solanum lycopersicum* L.; arena volcánica y; uso consuntivo.

2.2 ABSTRACT

This research evaluated the calibration and validation of the HORTSYST model, a dynamic growth model for tomato grown in greenhouses, which has as state variables the following: dry biomass production, thermal time, and nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium uptake; and as output variables: crop transpiration and leaf area index. The input variables of the model are hourly measurements of air temperature ($^{\circ}\text{C}$), relative humidity (RH, %) and global solar radiation (W m^{-2}); the model has 24 parameters of which 14 are estimated. Two experiments were set up with hydroponically-grown saladette type tomato with two stems per plant during the spring-summer growing season with a density of 3.5 plants m^{-2} . In the first experiment (calibration), the "Cid F1" variety was transplanted on April 24, 2015, at the Universidad Autónoma Chapingo and "tezontle" was used as substrate. The second experiment (validation) was carried out at the INIFAP- CE San Martinito, Puebla, and the "Moctezuma F1" variety was transplanted on April 24, 2021, using "tepetzil" as substrate. To evaluate the calibration and validation process, the following statistics were used: bias (*BIAS*), root mean square error (*RMSE*), modeling efficiency (*EF*) and coefficient of determination (*R*²). In the calibration, all the simulated variables had an *EF* and *R*² greater than 95%, whereas in the validation, most of them were greater than 80%, except for P_{up} , which had 48% in *EF*, both values being statistically acceptable. Model performance was efficient in both calibration and validation.

Keywords: Pumice; *Solanum lycopersicum* L; volcanic sand; consumptive use of water

2.3 INTRODUCCIÓN

La intensificación e industrialización de la agricultura para satisfacer la creciente demanda de alimentos a medida que crece la población mundial, aunado a la baja disponibilidad de agua, la disminución de espacios destinados a la agricultura y el impacto negativo en los cultivos debido al cambio climático, generan oportunidades y desafíos (Reyes-Guzmán, 2011). Uno de estos desafíos, es buscar alternativas para producir más en menos espacios agrícolas, optimizar el uso del agua y fertilizantes. No obstante, en las últimas dos décadas el crecimiento de los recursos informáticos, así como el intercambio de experiencias entre diferentes disciplinas del conocimiento, como la biología, fisiología, matemáticas e informática y el impulso de la electrónica ha permitido el desarrollo y aplicación de la modelación de cultivos a los sistemas de producción (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019).

Para simular el comportamiento de un sistema, se necesita un enfoque integral basado en modelos matemáticos (Lak *et al.*, 2018). En el caso, de la producción de sistemas agrícolas, el crecimiento de una planta se describe mediante ecuaciones matemáticas que permiten predecir procesos fisiológicos (fotosíntesis, transpiración, absorción nutrimental) y variables agronómicas (área foliar, densidad y rendimiento) (Soltani & Sinclair, 2012).

La modelación del crecimiento de un cultivo, en un sistema biológico con enfoque matemático, se puede realizar de dos maneras generales: mediante modelos empíricos, los cuales utilizan datos experimentales para encontrar uno o más ecuaciones matemáticas capaces de describir el comportamiento del sistema; o mediante modelos mecanicistas (dinámicos), basado en procesos biológicos, físicos y químicos, que implica una descripción cuantitativa del sistema (Masot, 2007; Miglietta & Bindi, 1993; Rauff *et al.*, 2015; Weiss *et al.*, 2021).

Los primeros ejemplos de modelos de crecimiento (mecanicistas) se han utilizado desde 1970 y entre los modelos más destacados están el BACROS, desarrollado para evaluar la fotosíntesis en los cultivos; SUCROS, propuesto para evaluar el crecimiento potencial de los cultivos (McMaster *et al.*, 2014; Modala *et al.*, 2015; van Ittersum *et al.*, 2003);

CERES (Jamieson *et al.*, 1998) y CROPGRO (Stöckle *et al.*, 2003). Estos modelos han sido aplicados para cultivos a cielo abierto, y muy pocos se han utilizado para simular el crecimiento y desarrollo de cultivos en sistemas intensivos protegidos, además, de que requieren una gran cantidad de parámetros. Para el cultivo de jitomate se han propuesto algunos modelos de simulación para predecir su crecimiento y desarrollo, por ejemplo; TOMGRO (Jones *et al.*, 1991), TOMSIM (Heuvelink, 1995) y TOMPOUSSE (Gary *et al.* 1996). Uno de los inconvenientes que presentan estos modelos, es que fueron desarrollados para lugares con condiciones climáticas y sistemas de producción diferentes y no consideran todos los procesos que están implicados en la producción. Un modelo más reciente, con un enfoque más integral es el modelo de simulación VEGSYST (Gallardo *et al.*, 2011; 2014; 2016; Giménez *et al.*, 2013), desarrollado para un sistema soporte de decisiones basado en modelos matemáticos para condiciones de cultivo en enarenado para climas del mediterráneo.

En México se ha desarrollado el modelo matemático HORTSYST, que predice el tiempo térmico (TT), la producción total de materia seca (DMP), la absorción de nitrógeno (N_{up} , $g\ m^{-2}$), fósforo (P_{up} , $g\ m^{-2}$), potasio (K_{up} , $g\ m^{-2}$), calcio (Ca_{up} , $g\ m^{-2}$), magnesio (Mg_{up} , $g\ m^{-2}$), índice de área foliar (LAI) y transpiración (ETc) (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; 2021); además, de incluir la densidad de plantación, como variable de manejo. En esta investigación, se analizó el crecimiento de jitomate en un sistema de producción intensiva a dos tallos por planta. Además, se propuso una modificación importante al modelo HORTSYST para simular LAI, utilizando el concepto TT o unidades calor, calculado a partir de la función beta, correlacionándola con el área foliar del cultivo a través una función Gompertz y afectado por la densidad de cultivo. Esto con el propósito de extender la aplicación del modelo HORTSYST a casos más generales como cultivos en suelo y a campo a cielo abierto. Por lo que se calibró y validó el modelo, para conocer su desempeño y capacidad de predicción y que en un futuro pueda implementarse para la toma de decisiones en el manejo de la programación de riegos y nutrición de cultivos.

2.4 OBJETIVOS

2.4.1 Objetivo general

Calibrar y validar el modelo de crecimiento HORTSYST, para predecir la producción de materia seca, consumo de agua y nutrimentos en un manejo de producción a dos tallos por planta.

2.4.2. Objetivos específicos

- Calibrar el modelo matemático HORTSYST durante el ciclo primavera-verano para predecir producción de materia seca, transpiración y absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- Validar el modelo matemático HORTSYST durante el ciclo primavera-verano para predecir producción de materia seca, transpiración y absorción de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg).
- Evaluar una nueva forma de cálculo del índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), utilizando el concepto de tiempo térmico (TT) o unidades calor en el modelo HORTSYST.
- Monitorear las condiciones ambientales que tienen relación en el proceso de producción en invernadero bajo un sistema hidropónico y que determina las necesidades de agua y nutrimentos para el cultivo de jitomate.

2.5 MATERIALES Y MÉTODOS

2.5.1 Sitio experimental

Se establecieron dos experimentos de ciclo primavera-verano. El primero, se ubicó en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México, a una altitud de 2250 m, con coordenadas geográficas: 19° 29' 41" latitud Norte y 98° 53' 21.7" longitud Oeste, en un invernadero con ventilación cenital de 8 m de ancho por 15 m de largo (área superficial de 120 m²). El segundo ensayo, se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental San Martinito, a una altitud de 2542 m, con las siguientes coordenadas geográficas: 19° 20' 51.43" latitud Norte y 98° 34' 3.51" longitud Oeste, en un invernadero cenital de 12 m de ancho y 52 m de largo (área superficial de 624 m²).

2.5.2 Establecimiento del cultivo

Para el presente trabajo de investigación, se usaron dos variedades de jitomate (*Solanum lycopersicum L.*) tipo saladette, de crecimiento indeterminado, en un sistema de producción intensiva hidropónica a dos tallos por planta. En el primer experimento (sitio UACH), se utilizó la variedad cv. "Cid F1", cuya siembra se realizó el 6 de marzo de 2016 y el trasplante se llevó a cabo el 24 de abril del mismo año, se empleó como sustrato "tezontle" (arena volcánica), se trasplantaron 105 plantas orientadas de norte a sur, en un arreglo a tres bolillos, en bolsas de 12 litros, a una distancia de 70 cm de centro a centro de cada bolsa y 80 cm de pasillo, con una densidad de 3.5 plantas m⁻². En el segundo experimento (sitio INIFAP) se utilizó la variedad cv. "Moctezuma F1", la siembra se realizó el 17 de febrero del 2021 y el trasplante se hizo el 24 de abril de 2021 en arreglo a tres bolillos, en bolsas de 13 litros, en hidroponía utilizando "tepojal o tepetzil" (piedra pómez) como sustrato; la distancia de centro a centro de cada bolsa fue 48 cm, con distancia entre pasillos de 1.1 m. La información recabada en el experimento de 2016 se utilizó para calibrar y con los datos del experimento de 2021, se llevó a cabo la validación del modelo HORTSYST.

2.5.3 Estrategia de programación de riego

El sistema de riego, para ambos ensayos experimentales, consistió en un sistema de fertirrigación automático, suministrando un caudal de 4 L h^{-1} en cada maceta. Se programaron 12 riegos diarios, con un tiempo de riego de un minuto, gradualmente se fue aumentando, conforme a la dinámica diaria de crecimiento y desarrollo del cultivo, alcanzando hasta cuatro minutos en el tiempo de riego para la etapa de mayor crecimiento. La estrategia de programación de los riegos, en el primer experimento, consistió en monitorear el volumen drenado en los siete lisímetros de drenaje instalados en la unidad experimental; la decisión de incrementar el tiempo de riego se hizo cuando al menos tres de los siete lisímetros registraron un volumen drenado igual al 5% del volumen aplicado. Al alcanzar este valor, se recopiló información de un lisímetro de pesada para ese día en cuestión, se integraron los valores de transpiración del día y al corroborar que el volumen transpirado era aproximadamente igual al volumen aplicado, se tomó la decisión de incrementar en un minuto la duración de los riegos y así sucesivamente hasta finalizar el experimento.

En el segundo experimento, la estrategia de riego se tomó como base únicamente los valores del drenaje de los cuatro lisímetros de drenaje instalados, incrementando el tiempo de riego cuando los valores del agua drenada eran cercanos al 5% del volumen aplicado en el riego. En ambos experimentos, cuando se realizó la labor de deshoje, se redujo el riego en un minuto, por efecto de la reducción del área foliar expuesta al proceso de transpiración.

2.5.4 Manejo de la solución nutritiva

Se aplicó la solución nutritiva, la solución universal de Steiner (1984) (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; 2020a; 2021), con un ligero ajuste en la etapa de fructificación. En la etapa vegetativa las concentraciones de los macro nutrientes fueron: (me L^{-1}) NO_3^- : 12, H_2PO_4^- : 1.5, K^+ : 7, Ca^{2+} : 9, Mg^{2+} : 4, SO_4^{2-} : 7, y la de los micro nutrientes fueron (mgL^{-1}) Fe^{2+} : 2, Mn^{2+} : 1, Zn^{2+} : 0.2, Cu^{2+} : 0.1 y Mo :0.08 En la etapa de fructificación se disminuyó en 1 meq L^{-1} el N (NO_3^- :11, meq L^{-1}) y aumentó 0.5 meq L^{-1} el K (K^+ :7.5, me L^{-1}). Las fuentes de los macro nutrientes fueron: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de

potasio, sulfato de magnesio, ácido fosfórico, y para micro nutrientes se utilizó una mezcla comercial. Para acidular el agua se usó ácido sulfúrico.

2.5.5 Datos climáticos

En los dos ensayos experimentales, se instaló una estación climática (Onset Computer Corporation ®) para monitorear las siguientes variables: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%) y radiación solar global ($W m^{-2}$); para la temperatura del aire y la humedad relativa se utilizó un sensor modelo S-THB-M008 (para temperatura del aire, una precisión de ± 0.21 °C de 0 °C a 50 °C, para humedad relativa, precisión de $\pm 2.5\%$ de 10% a 90%), colocado a 1.5 m sobre el suelo, para la radiación solar se usó un piranómetro modelo S-LIB-M003 (precisión de $\pm 10 W m^{-2}$), situado a 3.5 m sobre el suelo; ambos sensores se conectaron a un datalogger modelo U-30-NRC. Los datos se almacenaron cada minuto los cuales se promediaron para tener datos a nivel horario.

2.5.6 Determinación de la transpiración

En el primer experimento, la transpiración se midió siguiendo la metodología propuesta por Sánchez *et al.* 2008, Martínez-Ruiz *et al.* (2019; 2020a). Para ello se instaló un lisímetro de pesada, consistente en una balanza electrónica marca Sartorius modelo Combics 3, con una capacidad de 150 kg y precisión de ± 2 g. El registro de pérdida de masa de las plantas se hizo cada minuto y se guardó en una PC. Posteriormente se aplicó un filtrado a los datos y se promedió cada hora. Los datos se tomaron durante 124 días, comprendidos entre el 24 de abril al 26 de agosto del 2016.

En el segundo experimento, la transpiración se midió aplicando el método de balance (Gallardo *et al.*, 2014), instalándose cuatro lisímetros de drenaje de manera aleatoria en el invernadero. El drenaje se midió diariamente antes de iniciar el riego del siguiente día, aplicando la siguiente expresión.

$$ET_c = [(SWC_{t_0} - SWC_{t_1}) + I - D] \quad \text{Eq (1)}$$

donde; $(SWC_{t_0} - SWC_{t_1})$ es el cambio del contenido de humedad volumétrica (ΔSWC) entre dos mediciones sucesivas de humedad (t_0 y t_1), I y D son el volumen aplicado en el riego y el volumen drenado para un periodo considerado a nivel diario. El valor de

ΔSWC se consideró cercano a cero ya que los sustratos que se emplearon tienen una baja capacidad de retención.

2.5.7 Medición de variables del cultivo

Para obtener los datos del cultivo, en ambos experimentos se eligieron cuatro tallos (dos plantas) al azar para realizar muestreos cada 10 días. Se determinó: DMP , LAI , N_{up} , P_{up} , K_{up} , Ca_{up} y Mg_{up} . Para el DMP , las plantas se secaron durante 72 horas a 72 °C en una estufa de secado (modelo BINDER y modelo TECSA), para el primer y segundo experimento, respectivamente). La materia seca se midió por órgano (hojas, tallos y frutos) y la materia seca total, es la suma de las masas de todos los órganos. El área foliar, para el experimento de 2016, se obtuvo mediante un integrador de área foliar modelo LI-3100 (LI-COR), mientras que en el experimento de 2021 se estimó aplicando modelos alométricos con el largo y ancho de cada hoja y la densidad de plantación (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019).

2.5.8 Determinación de la absorción nutrimental

La extracción nutrimental se obtuvo, a partir de alícuotas, generadas, pesando 0.5 g de materia seca sometida a digestión húmeda con una mezcla de 2 mL de ácido sulfúrico y ácido perclórico en proporción 4:2, ambos ácidos con 98% de pureza, y adicionándole posteriormente 2 mL de peróxido de hidrógeno al 30%. Para obtener las alícuotas, las muestras fueron digestadas hasta su total mineralización a una temperatura de 200 °C durante aproximadamente seis horas, colocados sobre una plancha de arena con campana de extracción.

Posteriormente, las alícuotas se aforaron con 50 mL con agua desionizada (para el primer experimento, se utilizó una muestra de 0.25 g y se aforó a 25 mL). Finalmente, se filtraron las alícuotas obtenidas con papel Whatman No. 40 y se prosiguió a analizar los elementos. El nitrógeno se determinó por el método de Kjeldahl (Alcantar y Sandoval, 1999; Sáez-Plaza *et al.*, 2013). El P, K, Ca y Mg se determinaron mediante un equipo de espectrofotometría de emisión e inducción por plasma modelo ICP-OES 725-ES (VARIAN®).

2.5.9 Descripción del modelo de crecimiento HORTSYST

El modelo HORTSYST es un modelo de crecimiento dinámico no lineal para sistemas hidropónico de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. Este modelo fue desarrollado y adaptado como una herramienta para sistemas de apoyo a la decisión en invernaderos mexicanos para la aplicación de N y agua en la producción de tomate en sistemas intensivos. El modelo asume que los cultivos no tienen limitaciones de agua y nutrientes, que están libre de plagas y enfermedades, y con un manejo agronómico similar al que se encuentran en invernaderos comerciales (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; 2020a).

El modelo HORTSYST predice la producción de biomasa seca (DMP , $g\ m^{-2}$), el tiempo-térmico (TT , $^{\circ}C\ d$), absorción de N (N_{up} , $g\ m^{-2}$), P (P_{up} , $g\ m^{-2}$), K (K_{up} , $g\ m^{-2}$), Ca (Ca_{up} , $g\ m^{-2}$), y Mg (Mg_{up} , $g\ m^{-2}$), como variables de estado y transpiración del cultivo (ET_c , $kg\ m^{-2}$) e índice de área foliar (LAI , $m^2\ m^{-2}$) como variables de salida. Las variables de entrada del modelo son mediciones horarias de temperatura del aire ($^{\circ}C$), humedad relativa (HR, %) e integración de la radiación solar ($W\ m^{-2}$); el modelo cuenta con 24 parámetros (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019, 2021) de los cuales se estiman 14. El cálculo diario de ΔDMP se realiza en función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), de las características del cultivo, como LAI , y el parámetro de uso eficiente de la radiación (RUE , $g\ MJ^{-1}$) (De Reffye *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2008; Lemaire *et al.*, 2008).

Una de las modificaciones que se realizó al modelo es la forma de modelar el índice de área foliar (LAI), con la finalidad de que el modelo HORTSYST pueda aplicarse a casos más generales como en cultivo en suelo o a cielo abierto. Esta variable se obtuvo multiplicando el TT ($^{\circ}C\ d$), obtenido con una ecuación de Gompertz, por la densidad de plantación (d). Para ello, se calculó el tiempo térmico (TT , $^{\circ}C$), aplicando la función beta (Zhou & Wang, 2018), definido como la relación entre la tasa de crecimiento y las condiciones de la temperatura real, óptima y temperatura base, como se describe a continuación.

$$LAI_{j+1} = LA_j * d \quad \text{Eq (2)}$$

con

$$LA_j = p5 * \exp\left(-\exp\left(p6 - (p7 * TT_{j+1})\right)\right) \quad \text{Eq (3)}$$

$$TT_{i+1} = \begin{cases} 0; & T_{a,i+1} < T_b \\ \frac{(T_{a,i+1}-T_b)}{(T_o-T_b)} \frac{(T_u-T_{a,i+1})}{(T_u-T_o)} \frac{(T_u-T_o)}{(T_u-T_b)} (T_o - T_b); & T_b \leq T_{a,i+1} \leq T_u \\ 0; & T_u < T_{a,i+1} \end{cases} \quad \text{Eq (4)}$$

$$TT_{j+1} = \sum_{i=1}^{24} TT_{i+1} \quad \text{Eq (5)}$$

donde, LA_j es el área foliar en el día j -ésimo, TT_{i+1} y TT_{j+1} representa tiempo térmico en la hora $i + 1$ y del día $j + 1$ siguiente, LAI_{j+1} es el índice de área foliar del día siguiente, d es la densidad de plantación, $T_{a,i+1}$, T_b , T_o , T_u es la temperatura del aire en la hora siguiente, temperatura base ($T_b=10$ °C), temperatura óptima inferior y temperatura óptima superior, respectivamente. Los parámetros $p5$, $p6$ y $p7$ se estimaron durante la calibración, aplicando el método de mínimos cuadrados no lineales.

La absorción de N_{up} , P_{up} , K_{up} , Ca_{up} y Mg_{up} diarios, se calculan a partir de los valores de DMP simulados por el modelo y los valores del contenido nutrimental de cada elemento en DMP . Finalmente, la ETc se simula cada hora empleando la ecuación de Baile.

2.5.10 Modelo computacional

El modelo HORTSYST se programó en MATLAB-R2015a (MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, EE. UU.). Las ecuaciones dinámicas se codificaron dentro de una subrutina (función). Dos bucles iterativos permiten realizar cálculos diarios para las variables de salida y variables de estado, excepto para la transpiración, aunque se presenta a nivel diario el cálculo se realiza a nivel horario. Las salidas de la subrutina son las variables TT , DMP , N_{up} , P_{up} , K_{up} , Ca_{up} y Mg_{up} , ETc y LAI . Las variables de entrada de la subrutina son los parámetros del modelo (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019) y las variables climáticas (Figura 1). El programa principal (script MATLAB) llama a la subrutina y genera gráficos u otros cálculos necesarios para ejecutar las simulaciones (Martínez-Ruiz *et al.*,

2019). Para la estimación de parámetros se aplicó el método de optimización de mínimos cuadrados no lineales con el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

2.5.11 Evaluación del modelo

Para determinar la capacidad predictiva del modelo, tanto en el proceso de calibración y validación, se emplearon los siguientes estadísticos de bondad de ajuste: Sesgo (*BIAS*), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*RMSE*), eficiencia de modelado (*EF*) y el coeficiente de determinación (R^2). Además, para el caso de la calibración se presentan gráficos 1:1 entre los datos simulados y los datos medidos para apreciar visualmente la precisión de predicción del modelo durante la estimación de los parámetros.

Las estadísticas de ajuste, se definieron de la siguiente manera (Wallach *et al.*, 2014; Nash & Sutcliffe, 1970):

$$BIAS = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i) \quad \text{Eq (6)}$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad \text{Eq (7)}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq (8)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Eq (9)}$$

donde N es el número de mediciones, Y_i es el i -ésimo valor medido, \hat{Y}_i es el i -ésimo valor estimado por el modelo, y \bar{Y} es el promedio de los valores medidos. Cuanto más cerca de cero esté el valor del error cuadrático medio (RMSE), más preciso será el modelo. La eficiencia de modelado (EF) varía de 0 a 1; una eficiencia de 1 corresponde a una coincidencia perfecta entre los valores modelados y los datos observados (Ramírez-Pérez *et al.*, 2018). Según Ritter & Muñoz-Carpena (2013), el desempeño del modelo se clasifica como: no satisfactorio ($EF < 0.65$), aceptable ($0.65 \leq EF < 0.80$), bueno ($0.80 \leq EF < 0.90$) y muy bueno ($EF > 0.90$).

2.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se muestran los promedios diarios de la temperatura del aire (1A), la humedad relativa (1B) y la radiación solar global (1C) dentro de los invernaderos donde se realizaron los experimentos, para los ciclos primavera-verano 2016 y 2021.

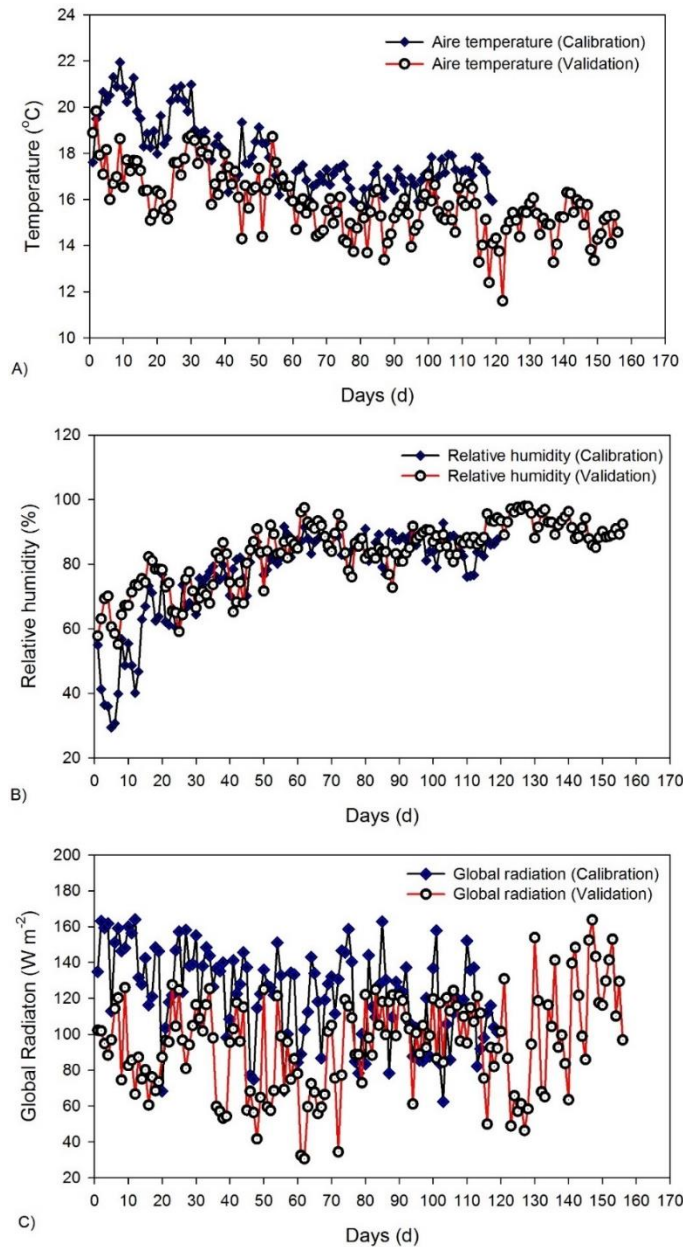


Figura 1. Temperatura media diaria del aire (A), humedad relativa (B) y radiación solar global (C) para el experimento 2016 (sitio UACH: datos para la calibración) y experimento 2021 (sitio INIFAP: datos para la validación)

Al inicio de los experimentos, se presentan las temperaturas más altas y estas fueron descendiendo a lo largo del ciclo, sin embargo, la humedad relativa siguió un comportamiento inverso a la temperatura. Los valores de temperatura y radiación solar global del año 2016, son más elevados que los del 2021, aunque ambas variables siguen las mismas tendencias en ambos ciclos de cultivo. La temperatura media registrada fue 17.8 °C para 2016 y 15.8 °C para 2021, la radiación solar fue 10.59 y 8.20 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente. La humedad relativa promedio diaria para 2016 es 76.8% y para el 2021 es 83.5%.

En el Cuadro 1 se muestran los parámetros obtenidos de la calibración del modelo HORTSYST, correspondientes a la absorción nutrimental del cultivo (a , b , a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 y b_4) y a las variables agronómicas (DMP , LAI y ETc). Los coeficientes p_5 , p_6 y p_7 , son utilizados para estimar el índice de área foliar y RUE (uso eficiente de la radiación), que se define como la relación entre la producción de materia seca y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada (Lemaire *et al.*, 2008). El valor obtenido de RUE fue 2.891 MJ m⁻² d⁻¹; este valor se encuentra dentro del rango (2.79 a 3.41 MJ m⁻² d⁻¹) observado en jitomate en el ciclo primavera por Martínez-Ruiz *et al.* (2021), y también se encuentra entre los valores obtenidos en jitomate por Giménez *et al.* (2013) y Gallardo *et al.* (2016), cuyos valores son 2.3 y 3.9 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente.

En el Cuadro 2 se muestran los resultados encontrados de los estadísticos de ajuste del modelo para la calibración y validación; en ambas etapas se observa un buen ajuste en todas las variables, ya que el coeficiente de determinación (R^2) es muy próximo a la unidad y según la eficiencia (EF) obtenida el desempeño es muy bueno (Ritter & Muñoz-Carpena, 2013). En la validación, LAI , P_{up} , K_{up} y Mg_{up} , presentan eficiencias de ajuste (EF) más bajas que en la calibración, debido a que para el año 2021 la radiación solar global y las temperaturas fueron más bajas en comparación con el año 2016 (Figura 1C); otro factor a considerar en las diferencias es que el sustrato empleado en los dos ensayos experimentales tienen diferente capacidad de retención de agua y diferentes características hidráulicas, esto trae efectos negativos importantes en el desarrollo y patrón de absorción del cultivo variedad cv. “Moctezuma F1” del experimento de 2021

(sustrato “tepetzil”) respecto de la variedad cv. “Cid F1” del ensayo de 2016 en el que se empleó como sustrato “tezontle”.

Cuadro 1. Parámetros obtenidos en la calibración del modelo de crecimiento HORTSYST para jitomate, con datos del experimento de 2016 (sitio UACH).

Variable de salida	Parámetros	Valores calibrados
Variables de crecimiento		
LAI ($m^2 m^{-2}$)	$P5$	2.691
	$P6$	1.899
	$P7$	0.003
DMP ($g m^{-2}$)	RUE	2.891
	$DMPini$	0.245
ETc ($kg m^{-2}$)	A	0.560
	Bd	15.690
	Bn	16.510
Absorción nutrimental		
N_{up} ($g m^{-2}$)	a	3.362
	b	-0.056
P_{up} ($g m^{-2}$)	$a1$	0.816
	$b1$	-0.020
K_{up} ($g m^{-2}$)	$a2$	1.286
	$b2$	0.189
Ca_{up} ($g m^{-2}$)	$a3$	2.962
	$b3$	-0.303
Mg_{up} ($g m^{-2}$)	$a4$	2.952
	$b4$	-0.327

a , a_1 , a_2 , a_3 y a_4 : concentración del nutrimento en biomasa seca al final del período de crecimiento exponencial; b , b_1 , b_2 , b_3 y b_4 : son la pendiente; p_5 , p_6 y p_7 : parámetros para índice de área foliar; RUE : Uso eficiente de la radiación; A : coeficiente radiativo; Bd : coeficiente aerodinámico diario; Bn : coeficiente aerodinámico nocturno.

El sesgo en la calibración y validación resultó negativo, y significa que el modelo subestima los valores observados. Este comportamiento lo observaron Martínez-Ruiz *et al.* (2019), con valores de -3.897 y -0.071, para DMP y N_{up} , respectivamente; sin embargo, para ETc reportaron un valor positivo de 3.647, que es una tendencia opuesta a lo obtenido para la calibración (-0.7975) y validación (-12.693) en este trabajo. La $RMSE$ resultó próxima a cero en la mayoría de las variables en la calibración y validación, excepto en la DMP y ETc ; sin embargo, los valores de estas dos variables son inferiores

que los encontrados por Gallardo *et al.* (2014) en la calibración (43.70 g m⁻² y 89.24 g m⁻², respectivamente) y validación (77.30 g m⁻² y 88.35 g m⁻², respectivamente) del modelo VEGSYT. Por otro lado, Giménez *et al.* (2013), encontraron un valor de 34.96 g m⁻² en DMP en la calibración para pepino, aunque se trata de otro cultivo da idea de la capacidad que tiene el modelo para pronosticar estas variables de salida dadas por el modelo VEGSYST.

Cuadro 2. Resumen de los índices estadísticos (BIAS, RMSE, EF, R²) obtenidos en la calibración y validación del modelo HORTSYST para las variables: *DMP*, *LAI*, *ET_c*, *N_{up}*, *P_{up}*, *K_{up}*, *Ca_{up}* y *Mg_{up}* en los experimentos de 2016 y 2021.

Variables	Calibración (experimento)				Validación (experimento)			
	BIAS	RMSE	EF	R ²	BIAS	RMSE	EF	R ²
DMP	-11.866	26.90	0.99	0.99	-3.455	42.17	0.99	0.99
LAI	-0.009	0.132	0.99	0.99	-0.959	1.148	0.81	0.99
ET _c	-0.797	2.505	0.99	0.99	-	14.73	0.97	0.99
N _{up}	-0.009	0.484	0.99	0.99	-1.264	2.038	0.94	0.98
P _{up}	-0.065	0.168	0.99	0.99	-0.634	0.951	0.47	0.98
K _{up}	-0.039	0.236	0.99	0.99	-3.218	5.615	0.84	0.98
Ca _{up}	-0.055	0.450	0.95	0.95	0.149	0.524	0.93	0.99
Mg _{up}	-0.042	0.236	0.98	0.98	-0.529	0.656	0.80	0.98

DMP: Producción de materia seca; LAI: Índice de área foliar; ET_c: Evapotranspiración; N_{up}: Absorción de nitrógeno; P_{up}: Absorción de fósforo; K_{up}: Absorción de potasio; Ca_{up}: Absorción de calcio; Mg_{up}: Absorción de magnesio.

La RMSE para ET_c en la validación resultó 14.73, valor mayor que 6.4 kg m⁻² encontrado por Giménez *et al.* (2013), pero menor que 39.33 kg m⁻², reportado por Martínez-Ruiz *et al.* (2019) para un cultivo de jitomate hidropónico a un tallo por planta. Otros modelos que se han utilizado para simular el comportamiento de la transpiración en invernaderos son GA-BP y NARX, ambos abordados por Wang *et al.* (2017) quienes reportan valores de RMSE de 0.9771 kg m⁻² y 0.7103 kg m⁻², respectivamente.

En la Figura 2 se observa el comportamiento de los valores medidos en 2016 (calibración) y los estimados por el modelo. Todas las variables simuladas muestran una tendencia muy similar a las observadas (poca dispersión de los datos); esto se confirma con los altos valores encontrados para la eficiencia de modelación y el coeficiente de determinación, los cuales en su gran mayoría son superiores que 0.98 (98%) (Cuadro 2). El valor de eficiencia (EF) de 0.811 para la variable *LAI* en la validación del modelo podría parecer bajo, pero estadísticamente y según Ritter & Muñoz-Carpena (2013) es bueno.

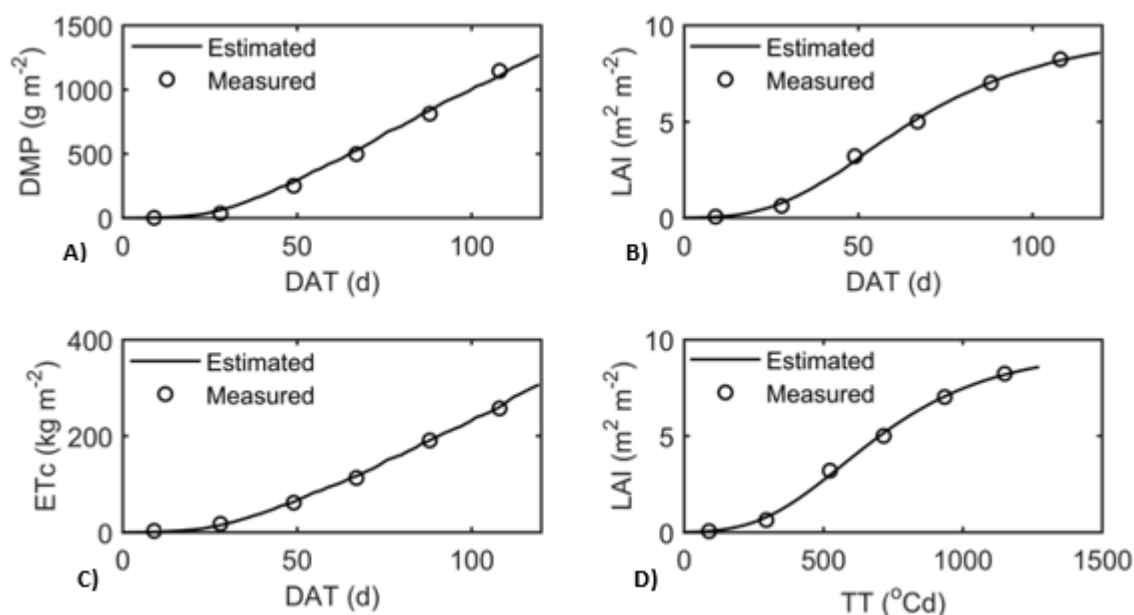


Figura 2. *DMP*: Producción de materia seca (A); *LAI*: índice de área foliar (B y D); *ETc*: transpiración del cultivo (C) para el experimento de 2016; (*DAT*: días después del trasplante, *TT*: tiempo térmico).

El submodelo propuesto para simular *LAI* arrojó un excelente ajuste en la calibración (Figura 2D); no obstante, en el caso de la validación generó un valor de $6 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para *LAI* a los 100 DDT (Figura 4B) y los valores de estadísticas de ajuste resultaron inferiores que los encontrados en la calibración; se sospecha que este comportamiento es debido a que *LAI* no se midió, sino que se estimó con modelos alométricos. Otros autores como Wang *et al.* (2017), realizaron la validación de los modelos TOM-*LAI* y TEP-*LAI*, para cultivo de jitomate, y encontraron que TEP-*LAI* genera mejores resultados en la estimación dinámica de *LAI*, obteniendo un valor de $2.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ a 100 DDT. Las diferencias de los valores de *LAI* encontrados por Wang *et al.* (2017) y en la presente

investigación, se debe a las diferencias en las densidades de plantación ya que en el primer caso se usó 2.01 plantas m^{-2} y en el segundo 3.5 plantas m^{-2} .

En la Figura 3 se muestran los comportamientos simulados y medidos de los nutrientes absorbidos por el cultivo en el ensayo realizado en 2016. En general, se observa un buen ajuste del modelo para todos los nutrientes y los valores de las estadísticas de ajuste (Cuadro 2) corroboran dicha aseveración, ya que el *BIAS* y la *RMSE* tienden a un valor cero. La eficiencia y el coeficiente de determinación son superiores que 95%. Además, en las gráficas 1:1 (FIGURA 3B, 3D, 3F, 3H y 3J) la dispersión de los datos estimados y medidos se sitúan sobre la línea 1:1, con ángulo de 45° , lo que indica un excelente ajuste del modelo durante la calibración.

Para el nitrógeno, los valores de los parámetros obtenidos en la calibración fueron $a = 3.362 \text{ g m}^{-2}$ y $b = -0.056$, los cuales son menores a los obtenidos por Martínez-Ruiz *et al.* (2019; 2020a) para jitomate en un sistema de un tallo por planta en 2018 y 2019, quienes encontraron valores de $a = 5.319 \text{ g m}^{-2}$ y $b = -0.155$, y $a = 5.850 \text{ g m}^{-2}$ y $b = -0.190$, respectivamente.

Para el fósforo, los parámetros encontrados fueron $a_1 = 0.816 \text{ g m}^{-2}$ y $b_1 = -0.020$, menores que $a_1 = 1.3374 \text{ g m}^{-2}$ y $b_1 = -0.1074$ encontrados por Martínez-Ruiz *et al.* (2020b). Esta variable fue la que menos se ajustó en el modelo HORTSYST (Cuadro 2 y Figura 5B), en la validación, pues presenta la eficiencia más baja de todas las variables, con un valor de 0.4791. Una de las razones por la que este elemento es difícil su ajuste es que es muy dependiente de varios factores tales como el manejo agronómico del cultivo, manejo del riego y las condiciones dinámicas del medio ambiente. Por ejemplo, la absorción de fósforo, se ve afectado por las bajas temperaturas durante el invierno, pero también por las altas temperaturas de verano y la alta humedad relativa en épocas de lluvias (Barker & Pilbeam, 2015), alta y baja radiación solar, lo cual trae como consecuencia un desajuste en el proceso de transpiración del cultivo. También un mal manejo del pH de la solución nutritiva puede ser un factor de influencia en el dinamismo de este elemento. En la presente investigación, el experimento se estableció en condiciones ambientales de alta humedad relativa.

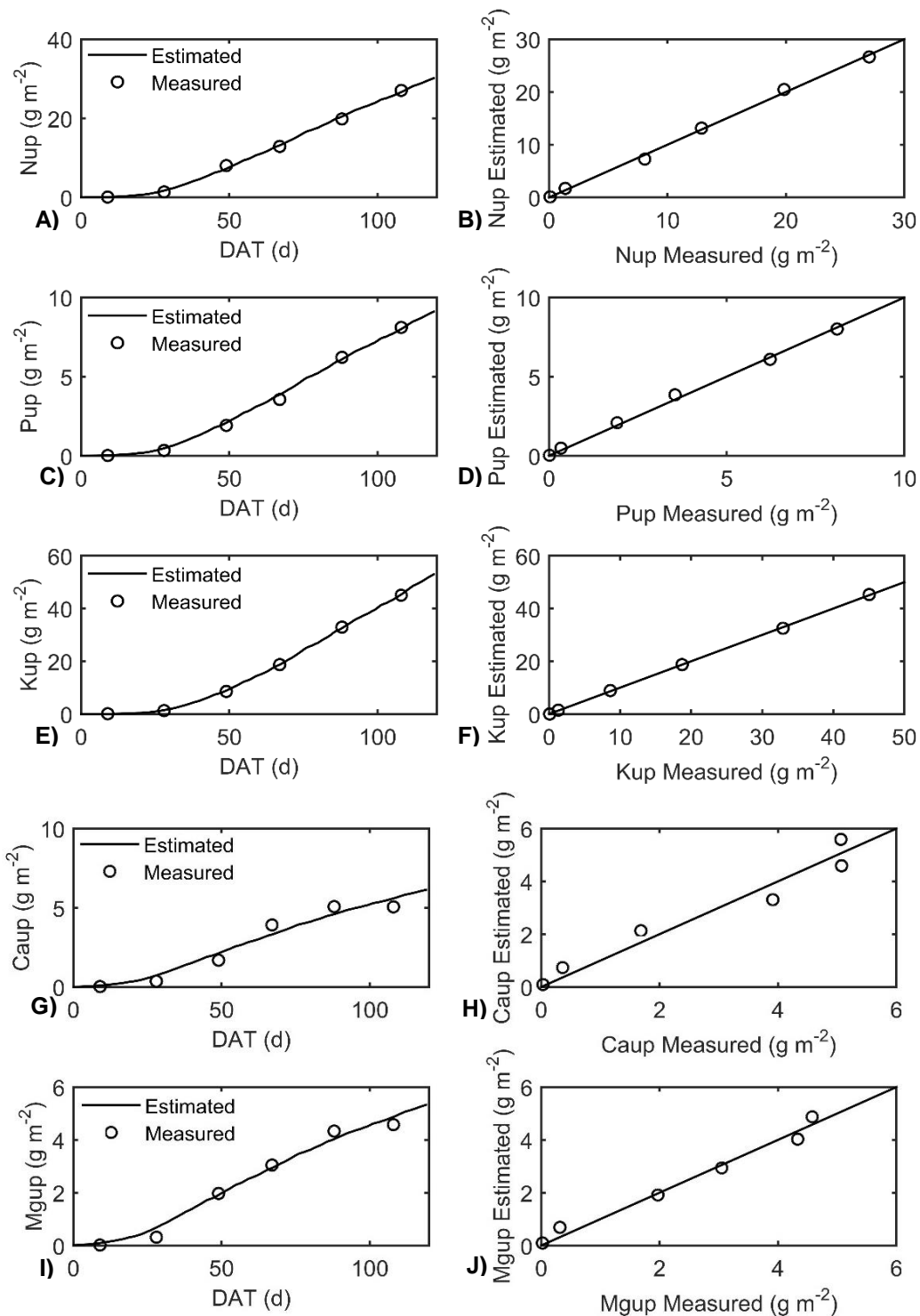


Figura 3. Absorción de nitrógeno (N_{up}) (A y B); fósforo (P_{up}) (C y D); potasio (K_{up}) (E y F); calcio (Ca_{up}) (G y H) y magnesio (Mg_{up}) (I y J) para el experimento 2016; (DAT: días después del trasplante).

Los parámetros obtenidos para potasio (K_{up}), calcio (Ca_{up}) y magnesio (Mg_{up}) fueron: $a_2=1.286 \text{ g m}^{-2}$ y $b_2=0.189$; $a_3=2.962 \text{ g m}^{-2}$ y $b_3=-0.303$; $a_4=2.952 \text{ g m}^{-2}$ y $b_4=-0.327$, respectivamente. El valor positivo del parámetro b en el potasio indica que el cultivo de jitomate es altamente demandante de dicho elemento; ya que, el parámetro da forma de la curva para este elemento (Figura 3E) encontrado y no concuerda con lo reportado por Gallardo *et al.* (2021). Los valores a y b de este trabajo se encuentran en los rangos reportados por Martínez-Ruiz *et al.* (2021), excepto para a_2 , b_3 y b_4 , los cuales son de 2.5 a 3.5 para a_2 , de -0.13 a -0.06 para b_3 , y de -0.140 a -0.07 para b_4 . Misle (2013) utilizó modelos alométricos y obtuvo los siguientes valores de $RMSE$: $K_{up} = 0.1179$, $Ca_{up} = 0.0991$ y $Mg_{up} = 0.0821$, que son menores que los obtenidos en este trabajo: $K_{up} = 0.2364$, $Ca_{up} = 0.449$, y $Mg_{up} = 0.2363$.

En las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos para la validación del modelo. A pesar de que la validación del modelo se realizó con datos obtenidos para una variedad diferente (cv. "Moctezuma F1"), ubicación del experimento y sustrato diferente a la etapa de calibración, los ajustes estadísticos resultaron aceptables, dejando evidente la robustez del modelo HORTSYST para evaluar y manejar el riego y la nutrición del sistema de cultivo intensivo a dos tallos por planta de esta investigación.

Los datos simulados durante la validación del modelo resultaron inferiores que los medidos (Figuras 4 y 5), excepto para las variables DMP (Figura 4A) y Ca_{up} (Figura 5D). Esto indica que hubo deficiencias de nutrientes y agua; sin embargo, visualmente el cultivo no presentó síntomas de deficiencias. Por otro lado, se sabe que la absorción de nutrientes está relacionada con la tasa de crecimiento (Vos & Marcelis, 2007), particularmente con la acumulación de biomasa seca (Misle, 2013; Zhang *et al.*, 2015).

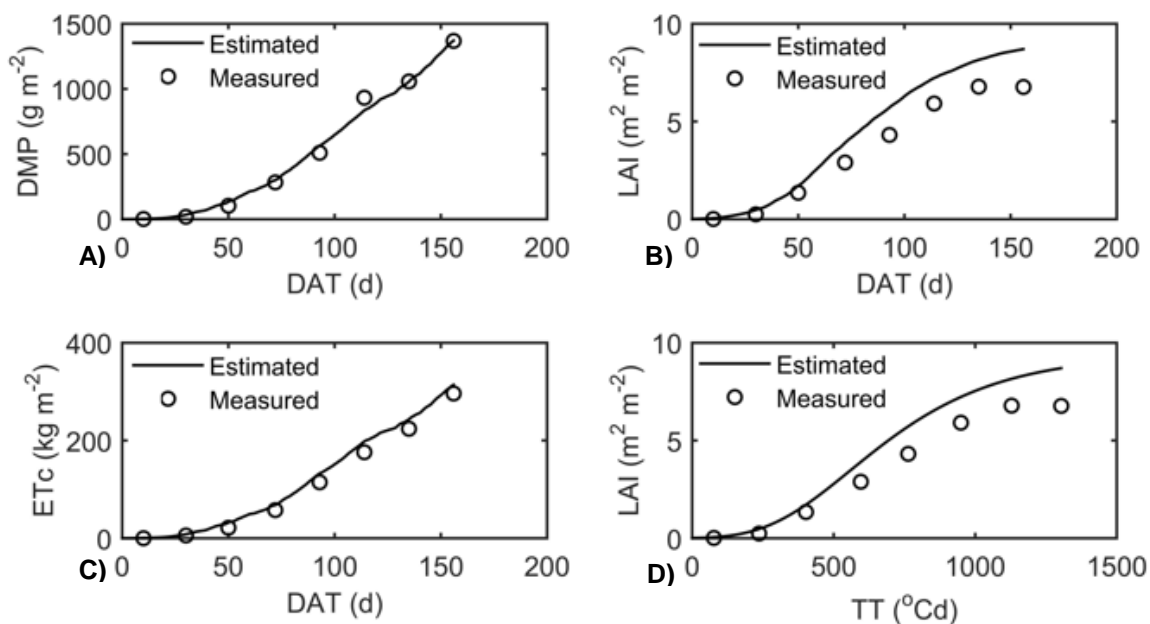


Figura 4. Producción de materia seca (*DMP*) (A); índice de área foliar (*LAI*) (B Y D) y transpiración del cultivo (*ETc*) (C) para el experimento de 2021; (*DAT*: días después del trasplante, *TT*: tiempo térmico).

En efecto, en esta investigación, el cultivo del experimento de 2021 (validación) mostró menor producción de biomasa seca respecto al experimento de 2016 (calibración), debido a que la absorción de nutrientes (Figura 5) fue afectada por los mayores valores de humedad relativa (Figura 1B). Ramírez-Pérez *et al.* (2018), realizaron una validación para pepino, por órgano, y obtuvieron las mismas tendencias de esta investigación para los nutrientes. Similarmente, Zijiang (2016) trabajó con jitomate, generando modelos por órgano y sugiere usar datos más dispersos durante todo el desarrollo de la planta, así como medir la composición mineral de toda la planta en lugar de órganos separados durante el ciclo del cultivo. Procediendo de esta forma, se elimina el error potencial causado por la predicción inexacta del modelo de partición, además de considerar otros factores como la densidad y humedad, los cuales son factores cruciales que afectan el crecimiento y la absorción de nutrientes.

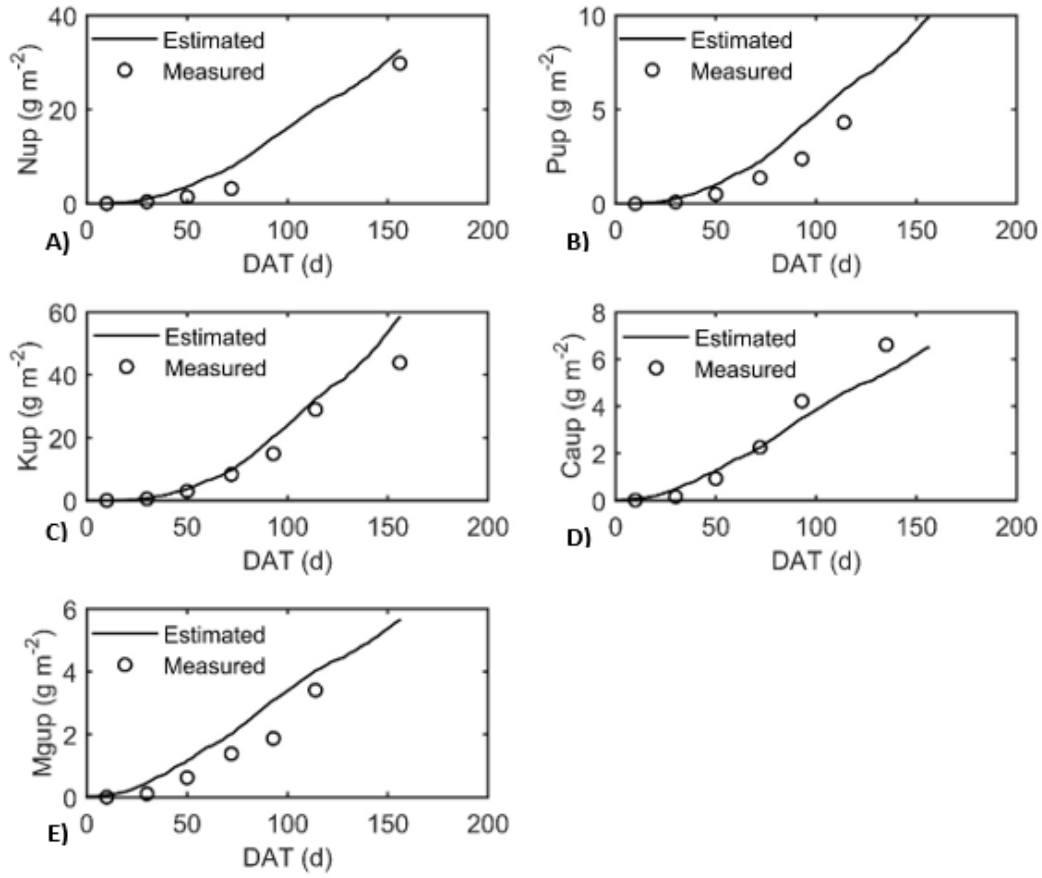


Figura 5. Absorción de calcio (N_{up}) (A); fósforo (P_{up}) (B); potasio (K_{up}) (C); calcio (Ca_{up}) (D) y absorción de magnesio (Mg_{up}) (E) para el experimento de 2021; (DAT: días después del trasplante).

2.7 CONCLUSIONES

El modelo HORTSYST proporciona una excelente calidad predictiva para la producción de materia seca (DMP), absorción de nitrógeno (N_{up}), fósforo (P_{up}), potasio (K_{up}), calcio (Ca_{up}), magnesio (Mg_{up}), evapotranspiración (ET_c) e índice de área foliar (LAI). Esto al obtenerse estadísticas de ajustes bastantes aceptables ($BIAS$, EF , $RMSE$ y R^2). Así mismo, los parámetros del modelo calibrado encontrados representan los valores óptimos y correctos para ser utilizados en la simulación de las variables de salidas evaluadas, los cuales son útiles para la toma de decisiones en el manejo de los sistemas de producción intensiva a dos tallos por planta. Por otra parte, la expresión matemática propuesta para simular LAI a partir del concepto tiempo térmico (unidades calor) resultó muy eficiente, por lo que esta modificación permite aplicar el modelo para evaluar cultivos no solo en sistemas hidropónicos sino también para cultivos en sistemas en suelo y hortalizas en campo a cielo abierto.

El modelo HORTSYST es un modelo completo ya que pocos modelos de crecimiento de cultivos consideran la simulación de la absorción de nutrimentos y la evapotranspiración del cultivo como variables importantes para la toma de decisiones en el manejo de los sistemas agrícolas. sin embargo, para sistemas de cultivos a dos tallos por plantas se necesita más investigación para validar con el ciclo otoño-invierno, con otros sustratos, diferentes niveles de riego y nutrición. La ventaja de este modelo es que presenta un número reducido de parámetros por lo que su implementación a través de un sistema soporte de decisiones (DSS) en los invernaderos comerciales puede ser factible.

CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados de esta investigación permitieron conocer el comportamiento que tienen las variables morfológicas, fisiológicas y nutrimentales en el cultivo de jitomate en tres densidades.

A mayor densidad aumenta el rendimiento de fruto, la transpiración y el consumo de fertilizantes, por unidad de superficie.

No hay diferencia estadística significativa en la productividad de agua para los tres tratamientos.

El monitoreo de las variables climáticas, como la temperatura, radiación solar y la humedad relativa, son muy importantes, pues no solo permiten el desarrollo de las plantas, sino que condicionan el consumo de agua durante todo el ciclo, por ello se recomienda mantenerlas monitoreadas para la ejecución del riego.

Al calibrar y validar el modelo HORTSYST, se obtuvieron excelentes ajustes en los datos medidos y simulados. Estos parámetros encontrados se pueden utilizar para predecir el consumo de agua y nutrimentos en el ciclo de jitomate para primavera-verano a dos tallos por planta.

El modelo HORTSYST podría integrarse en un sistema de soporte a la toma de decisiones (DDS, por sus siglas en inglés), para ayudar a los productores en el seguimiento de la producción de jitomates en invernaderos. Este modelo podría adaptarse a otros cultivos en invernadero y también podría mejorar considerando un cultivo bajo estrés por agua o nutrimentos.

LITERATURA CITADA

- Alcántar-González, G., & Sandoval-Villa, M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial, 10.
- Barker, A. V, and Pilbeam, D.J. (2015). Handbook of Plant Nutrition (CRC press), pp.774.
- Barraza, F. v., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 22(1), 81–90.
- 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.
- Carrillo, J. C., Jiménez, F., Ruiz, J., Díaz, G., Sánchez, P., Perales, C., & Arellanes, A. (2003). Evaluación de densidades de siembra en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero. *Agronomía mesoamericana*, 14(1), 85-88.
- Casanova, A., O. Gómez, F. Pupo y M. Hernández. 2007. Manual para la Producción Protegida de Hortalizas. Editorial Liliana. La Habana. 138 p.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Castillo, S. D., Moreno-Pérez, E. D. C., Pineda-Pineda, J., Osuna, J. M., Rodríguez-Pérez, J. E., & Osuna-Encino, T. (2014). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185-197.
- Corella Bernal, R. A., Soto Ortiz, R., Escoboza García, F., Grimaldo Juárez, O., Huez López, M. A., & Ortega Nieblas, M. M. (2013). Comparación de dos tipos de poda en tomate *lycopersicon esculentum* mill., sobre el rendimiento en invernadero. XVI Congreso Internacional de Ciencias Agrícolas 24 y 25 de Octubre de 2013 Producción y Protección de Cultivos Bajo Un Escenario de Cambio Climático, 688–691.
- Chu, J. X., Sun, Z. F., Du, K. M., Jia, Q., & Liu, S. (2009). Establishment of dynamic model for the nutrient uptake and development about tomato in greenhouse. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_6
- De Reffye, P., Heuvelink, E., Guo, Y., Hu, B.-G., & Zhang, B.-G. (2009). Coupling Process-Based Models and Plant Architectural Models: A Key Issue for Simulating Crop Production. *Crop Modeling and Decision Support*, 130–147. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_15
- Du, T., Kang, S., Zhang, X., Zhang, J., 2014. China's food security is threatened by the unsustainable use of water resources in North and Northwest China. *Food Energy Secur.* 3, 7–18. <http://dx.doi.org/10.1002/fes3.40>.

- Enriquez-Reyes, S. A., Alcántar-González, G., Castellanos-Ramos, J. Z., Arjona Suarez, E., González-Eguiarte, D., & Lazcano-Ferrat, I. (2003). NUMAC-N Tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust. Terra: Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, AC.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2016). Panorama Agroalimentario. Tomate Rojo. México: Author. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200635/Panorama_Agroalimentario_Tomate_Rojo_2016.pdf
- Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. Terra Latinoamericana, 25(2), 127-134.
- Galvez, J. (2005). Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. Current Agricultural Science and Technology, 11(1).
- Gallardo, M., Cuartero, J., Andújar de la Torre, L., Padilla, F. M., Segura, M. L., & Thompson, R. B. (2021). Modelling nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium uptake, and uptake concentration, of greenhouse tomato with the VegSyst model. Scientia Horticulturae, 279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109862>
- Gallardo, M., Fernández, M. D., Giménez, C., Padilla, F. M., & Thompson, R. B. (2016). Revised VegSyst model to calculate dry matter production, critical N uptake and ETc of several vegetable species grown in Mediterranean greenhouses. Agricultural Systems, 146, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.03.014>
- Gallardo, M., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., Stöckle, C. O., Thompson, R. B., & Granados, M. R. (2011). Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. Agricultural Water Management, 101(1), 107–117. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2011.09.008>
- Gallardo, M., Thompson, R. B., Giménez, C., Padilla, F. M., & Stöckle, C. O. (2014). Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. Irrigation Science, 32(3), 237–253. <https://doi.org/10.1007/S00271-014-0427-3/TABLES/9>
- Gandica Omaña, H., & Peña, H. (2015). Acumulación de materia seca y balance de nutrientes en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en ambiente protegido. Bioagro, 27(2), 111-120.
- Gary, C., Baille, A., Navarrete, M., Espanet, R. TOMPOUSSE, un modèle simplifié de prévision du rendement et du calibre de la tomate. Séminaire, Mar 1996, Alénia, France. <hal-02769257>

- Giménez, C., Gallardo, M., Martínez-Gaitán, C., Stöckle, C. O., Thompson, R. B., & Granados, M. R. (2013). VegSyst, a simulation model of daily crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration for pepper crops for use in an on-farm decision support system. *Irrigation Science*, 31(3), 465–477. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0312-2>
- He, F.F., Jiang, R.F., Chen, Q., Zhang, F.S., Su, F., 2008. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China. *Environ. Pollut.* 157, 1666–1672. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2008.12.017>.
- Hernández, M., M. Chailloux, V. Moreno, M. Mojena y J. Salgado. 2009. Relaciones nitrógeno-potasio en fertirriego para el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su efecto en la acumulación de biomasa y extracción de nutrientes. *Cultivos Tropicales* 30(4): 71-78.
- Heuvelink, E. (1995). Dry Matter Production in a Tomato Crop: Measurements and Simulation. *Annals of Botany*, 75(4), 369–379. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1995.1035>
- Hickman, G.W., 2018. International Greenhouse Vegetable Production –Statistics. Cuesta Roble Consulting, Mariposa, CA, USA www.cuestaroble.com. (accessed 20.04.2022).
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., Goudriaan, J., Ritchie, J. T., van Keulen, H., & Stol, W. (1998). A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Research*, 55(1–2), 23–44. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00060-9)
- Jones, J. B. (1999). *Tomato Plant Culture*. CRC Press LLC. Florida U.S.A. 199 p.
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., van Keulen, H., & Challa, H. (1991). A DYNAMIC TOMATO GROWTH AND YIELD MODEL (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*, 34(2), 663–6672. <https://doi.org/10.13031/2013.31715>
- Juárez-Maldonado, A., de Alba Romenus, K., Zermeño González, A., Ramírez, H., & Benavides Mendoza, A. (2015). Análisis de crecimiento del cultivo de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 943–954.
- Juárez-Maldonado, A., de-Alba-Romenus, K., Morales-Díaz, A. B., & Benavides-Mendoza, A. (2017). Macro-nutrient uptake dynamics in greenhouse tomato crop. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1908–1919. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1270310>
- Kang, M. Z., Cournède, P. H., de Reffye, P., Auclair, D., & Hu, B. G. (2008). Analytical study of a stochastic plant growth model: Application to the GreenLab model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78(1), 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2007.06.003>

- Lak, M. B., Minaei, S., Soufizadeh, S., Banakar, A., & Minaei, S. (2018). Agricultural crop growth modelling: a tool for dealing with the threat of climate change affecting food security (case study for greenhouse tomato). In GEOSCIENCES (Vol. 106). www.gsjournal.ir
- Lemaire, S., Maupas, F., Cournède, P. H., & de Reffye, P. (2008). A Morphogenetic Crop Model for Sugar-Beet (*Beta vulgaris* L.).
- Llanderal, A., Lao, M. T., Contreras, J. I., & Segura, M. L. (2018). Diagnosis and Recommendation integrated system norms and sufficiency ranges for tomato greenhouse in Mediterranean climate. *HortScience*, 53(4), 479-482.
- López Marín, L. M. (2016). Manual técnico del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia En Tecnología Agropecuaria (INTA), 1–130.
- Malone, M., White, P., & Morales, M. A. (2002). Mobilization of calcium in glasshouse tomato plants by localized scorching. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 83-88.
- Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral nutrition of higher plants. Third edition. Academic Press. London. 649 p. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780123849052>.
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., & Prado-Hernández, J. V. (2019). HortSyst: A dynamic model to predict growth, nitrogen uptake, and transpiration of greenhouse tomatoes. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 79(1), 89–102. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392019000100089>
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., Pineda-Pineda, J., Sánchez-García, P., & Mendoza-Pérez, C. (2021). Uncertainty analysis of the hortsyst model applied to fertigated tomatoes cultivated in a hydroponic greenhouse system. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 19(3). <https://doi.org/10.5424/sjar/2021193-17842>
- Martinez-Ruiz, A., Sánchez-García, P., Pineda-Pineda, J., Prado-Hernández, J. v., & Ruiz-García, A. (2020a). Prediction of nitrogen, phosphorus and potassium uptake using a photothermal model. *Acta Horticulturae*, 1296, 469–475. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1296.61>
- Martinez-Ruiz, A., Pineda-Pineda, J., Ruiz-García, A., Prado-Hernández, J. v., López-Cruz, I. L., & Mendoza-Perez, C. (2020b). The HORTSYST model extended to phosphorus uptake prediction for tomatoes in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 1271, 301–306. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1271.41>
- Masot, A. (2007). Engineering photosynthetic systems for bioregenerative life support. <http://ddd.uab.cat/record/37901>

- McMaster, G. S., Ascough II, J. C., Edmunds, D. A., Wagner, L. E., Fox, F. A., DeJonge, K. C., & Hansen, N. C. (2014). Simulating Unstressed Crop Development and Growth Using the Unified Plant Growth Model (UPGM). *Environmental Modeling & Assessment*, 19(5), 407–424. <https://doi.org/10.1007/s10666-014-9402-x>
- Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Martínez-Ruiz, A., Rubiños-Panta, J. E., Trejo, C., Vargas-Orozco, A. G., Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Martínez-Ruiz, A., Rubiños-Panta, J. E., Trejo, C., & Vargas-Orozco, A. G. (2018). Efecto de número de tallos en la producción y calidad de jitomate cultivado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(2), 355–366. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V9I2.1077>
- Miglietta, F., & Bindi, M. (1993). Crop growth simulation models for research, farm management and agrometeorology. *EARSEL Advances in Remote Sensing*, 2(6), 148–157.
- Misle, E. (2013). SIMULATING THE ACCUMULATION OF MINERAL NUTRIENTS BY CROPS: AN ALLOMETRIC PROPOSAL FOR FERTIGATION. *Journal of Plant Nutrition*, 36(9), 1327–1343. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.790426>
- Modala, N. R., Ale, S., Rajan, N., Munster, C. L., DeLaune, P. B., Thorp, K. R., Nair, S. S., & Barnes, E. M. (2015). Evaluation of the CSM-CROPGRO-Cotton Model for the Texas Rolling Plains Region and Simulation of Deficit Irrigation Strategies for Increasing Water Use Efficiency. *Transactions of the ASABE*, 58(3), 685–696. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10833>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. v. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Nuez, F. 1995. *El Cultivo del Tomate*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 767 p.
- Núñez Ramírez, F., Grijalva Contreras, R. L., Macías Duarte, R., Robles Contreras, F., & Ceceña Duran, C. (2012). Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en tomate de invernadero. *Biocencia*, 14(3), 25–31.
- Papadopoulos A P, S Pararajasingham (1997) The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review. *Scientia Hort.* 69:1-29.
- Passam, H. C., Karapanos, I. C., Bebeli, P. J., & Savvas, D. (2007). A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. *The European journal of plant science and biotechnology*, 1(1), 1-21.
- Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, A., Sánchez Del Castillo, F., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., & Vargas-Canales, J. M. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions.

- Acta Horticulturae, 893, 997–1006.
<https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2011.893.112>
- Ramírez-Pérez, L. J., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., De-Alba-Romenus, K., González-Morales, S., & Juárez-Maldonado, A. (2018). Dynamic modeling of cucumber crop growth and uptake of N, P and K under greenhouse conditions. *Scientia Horticulturae*, 234, 250–260.
<https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2018.02.068>
- Rauff, K. O., Bello, R., Rauff, K. O., & Bello, R. (2015). A Review of Crop Growth Simulation Models as Tools for Agricultural Meteorology. *Agricultural Sciences*, 6(9), 1098–1105. <https://doi.org/10.4236/AS.2015.69105>
- Reyes Guzmán, G. (2011). Reseña de “El futuro de la alimentación y la agricultura: retos y alternativas para una sustentabilidad” de Sir John Beddington. *Revista Latinoamericana de Economía*, 42(166), 176–178.
- Rincón, L., Pérez, A., Abadía, A., & Pellicer, C. (2005). Yield, water use and nutrient uptake of a tomato crop grown on coconut coir dust. *Acta Horticulturae*, 697, 73–79. <https://doi.org/10.17660/ACTAHORTIC.2005.697.7>
- Ritter, A.; Muñoz-Carpena, R. Performance Evaluation of Hydrological Models: Statistical Significance for Reducing Subjectivity in Goodness-of-Fit Assessments. *J. Hydrol.* 2013, 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). Modeling and control of greenhouse crop growth (p. 250). Basel, Switzerland: Springer International Publishing.
- Sáez-Plaza, P., Navas, M. J., Wybraniec, S., Michałowski, T., & Asuero, A. G. (2013). An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 43(4), 224–272.
<https://doi.org/10.1080/10408347.2012.751787>
- Salazar Moreno, R., Rojano Aguilar, A., & López Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(2), 177–183.
- Salazar-Moreno, R., Sánchez-Martínez, A. C., & López-Cruz, I. L. (2020). Indicadores para evaluar el desempeño en el uso del agua, energía y mano de obra en un invernadero de baja tecnología. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 26(2), 95–110.
- Sánchez del C F, J Ortiz, M C Mendoza, V A González, M T Colinas (1999) Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia* 33:21-29.

- Sánchez, A., Guzmán, L., Rodríguez, F. y Berenguel, M. (2008). Modelado de la transpiración de un cultivo de tomate bajo invernadero para el diseño de sistemas de control de riego. Departamento de Lenguajes y Computación. Universidad de Almería, Almería, España.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. México: Author. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255627/Planeacion_Agricola_Nacional_2017-2030- parte_uno.pdf
- Segura-Castruita, M. Á., Ramírez-Seañez, A. R., García-Legaspi, G., Preciado-Rangel, P., García-Hernández, J. L., Yescas-Coronado, P., ... & Montemayor-Trejo, J. A. (2011). Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pómez con tres diferentes frecuencias de riego. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 17(SPE1), 25-31.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2021. Cierre de la producción agrícola. México. <https://www.gob.mx/siap>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *Int. Agrophys*, 32, 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Soltani, Afshin., & Sinclair, T. R. (2012). *Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield*. 336.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., & Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 289–307. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00109-0)
- Tinoco, C. E., Gutiérrez, G. A. M., Bolaños, T. A., & Sánchez, D. M. (2014). Porosidad de Mallas y Exclusión de Insectos Plaga en Invernaderos con Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Screen Porosity and Exclusion of Pest in Greenhouse Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.). *Southwestern Entomologist*. 39(3): 624-643
- van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J., Bastiaans, L., & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 201–234. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5)
- van Straten, G., van Willigenburg, G., van Henten, E., & van Ooteghem, R. (2010). *Optimal control of greenhouse cultivation*. CRC press.
- Vargas-Canales, J. M., Castillo-González, A. M., Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, J. A., & Avitia-García, E. (2014). Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista*

- Chapingo, Serie Horticultura, 20(1), 71–88.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.02.005>
- Velasco-Alvarado, M. de J., Castro-Brindis, R., Castillo-González, A. M., Avitia-García, E., Sahagún-Castellanos, J., & Lobato-Ortiz, R. (2016). MINERAL COMPOSITION, BIOMASS AND FRUIT YIELD IN GRAFTED TOMATO (*Solanum Lycopersicum* L.). *Interciencia*, 41(10), 703–708.
- Vos, J., & Marcelis, L. F. M. (2007). FUNCTIONAL-STRUCTURAL PLANT MODELLING IN CROP PRODUCTION Adding a dimension.
- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., and Brun, F. 2014. Working with Dynamic Crop Models. Methods, tools and examples for agriculture and environment. 2ed. 504 p. Academic Press-Elsevier, Cambridge, Massachusetts, USA.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397008-4.00008-3>.
- Wang, H., Sánchez-Molina, J. A., Li, M., Berenguel, M., Yang, X. T., & Bienvenido, J. F. (2017). Leaf area index estimation for a greenhouse transpiration model using external climate conditions based on genetics algorithms, back-propagation neural networks and nonlinear autoregressive exogenous models. *Agricultural Water Management*, 183, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.021>
- Wang, J., Li, X., Lu, L., & Fang, F. (2013). Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method. *Environmental Modelling & Software*, 48(October), 171–182.
- Weiss, A., Flerchinger, G. N., McMaster, G. S., Wang, E., White, J. W., Yin, X., Struik, P. C., & Wienk, J. F. (2021). Recent advances in crop growth modelling. *https://Doi.Org/10.1016/j.Njas.2009.12.001*, 57(1), 3.
<https://doi.org/10.1016/J.NJAS.2009.12.001>
- Zhang, Y., Kiriwa, Y., & Nukaya, A. (2015). Influence of Nutrient Concentration and Composition on the Growth, Uptake Patterns of Nutrient Elements and Fruit Coloring Disorder for Tomatoes Grown in Extremely Low-volume Substrate. *The Horticulture Journal*, 84(1), 37–45. <https://doi.org/10.2503/HORTJ.MI-003>
- Zhou, G., & Wang, Q. (2018). A new nonlinear method for calculating growing degree days OPEN. 8, 10149. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28392-z>
- Zijiang, Y. (2016). Dynamic model for nutrient uptake by tomato plant in hydroponics.