

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, FENOLOGÍA
Y CRECIMIENTO PARA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN TOMATE EN
INVERNADERO

Tesis

Que presenta FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila

Junio 2021

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, FENOLOGÍA
Y CRECIMIENTO PARA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN TOMATE EN
INVERNADERO

Tesis

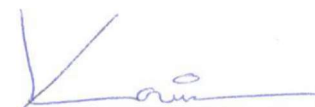
Elaborada por FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ como requisito parcial para obtener
el Grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación del
Comité de Asesoría



Dr. Álvaro Morelos Moreno
Asesor principal



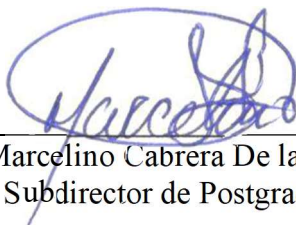
Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Asesor



Dr. Karim de Alba Romenus
Asesor



Ph. D. Vicente de Paul Álvarez Reyna
Asesor



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado

Agradecimientos

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, institución que me brindó apoyo, oportunidad para aprender, desarrollar habilidades y aplicar mis conocimientos para hacer este sueño realidad: ser Maestro en Ciencias en Horticultura.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por el apoyo económico recibido para realizar mi estudio de Maestría en Ciencias en Horticultura.

A mi **Comité de Asesoría de Tesis**

- Dr. Álvaro Morelos Moreno
- Dr. Marcelino Cabrera de la fuente
- Dr. Karim de Alba Romenus
- Ph. D. Vicente de Paul Álvarez Reyna

Por la confianza, apoyo y asesoría brindada durante mis estudios y trabajo de tesis.

A **Los Profesores de Postgrado**, por compartir sus conocimientos y experiencias.

A **Mis Compañeros(as) de Postgrado**, por el apoyo recibido y compartir los momentos durante nuestros estudios.

A **Kenia Lizeth Chibli Hernández**, por la confianza, consejos y apoyo incondicional durante los buenos y malos momentos que se presentaron hasta cumplir este sueño.

Dedicatoria

MIS PADRES

Sr. Juan González Pérez y Sra. Yaneth Hernández Ramírez

Por darme la vida, el apoyo desde la distancia, la confianza depositada en mí y los mejores consejos para superarme constantemente y que siempre tuve presente hasta alcanzar esta meta: ser Maestro en Ciencias en Horticultura.

MIS HERMANAS

Blanca Fabiola González Hernández e Ilsi Yasmín González Hernández

Por su apoyo desde la distancia para alcanzar esta meta.

MIS ABUELOS

Sr. Artemio Hernández Pérez y Sra. María Ramírez Pérez (†)

Por el apoyo recibido y consejos desde la distancia durante mis estudios, siempre estaré agradecido por todo.

Sr. Juan González Coutiño (†) y Sra. Francisca Pérez Pérez (†),

Aunque no lograron ver la persona que ahora soy, siempre estarán en mi corazón y mis logros son suyos.

Índice General

Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
RESUMEN	viii
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
HIPÓTESIS	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Factores climáticos que afectan el cultivo de tomate	4
Sustratos en Horticultura	6
Riego de los cultivos	8
La evapotranspiración	9
Crecimiento del cultivo de tomate	15
Modelos matemáticos	17
Modelos matemáticos de evapotranspiración y crecimiento en tomate	19
Perspectivas a futuro sobre el uso eficiente del agua en agricultura	20
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Ubicación del experimento	21
Manejo agronómico de cultivo	21
Diseño experimental	22
Desarrollo de la fase agronómica	23
Modelo de simulación matemática	25
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
Densidad de sustrato	27
Volúmenes de riego aplicado	27
Simulación del consumo del agua de riego	29
Estados de desarrollo del cultivo	30

Variables de crecimiento del cultivo.....	31
Variables de rendimiento del cultivo.....	35
Clima del invernadero	39
CONCLUSIONES	44
LITERATURA CITADA.....	45
ANEXO. Análisis de varianza.....	54

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los métodos para estimar la ET (García-Solís, 2016).....	12
Tabla 2. Fenología del cultivo de tomate (Benton-Jones, 2007).....	16
Tabla 3. Distribucion de los tratamientos	22
Tabla 4. Tiempo de riego aplicado en las etapas de crecimiento del cultivo de tomate.....	23
Tabla 5. Productividad o rendimiento obtenido por unidad de volumen de agua aplicada.....	28

Índice de Figuras

Figura 1. Crecimiento del cultivo de tomate a través del tiempo.	15
Figura 2. Proporción de sustrato y la densidad de sustrato.....	27
Figura 3. Riego aplicado a tomate	28
Figura 4. Volumen de agua acumulado	29
Figura 5. Simulación del consumo del agua de riego con una función senoidal	29
Figura 6. Etapas fenologicas en dos ciclos de cultivo.....	31

Figura 7. Altura de la planta.....	31
Figura 8. Numero de hojas de la planta	31
Figura 9. Peso fresco de hojas por planta y hojas podadas.....	32
Figura 10. Peso seco de hojas por planta y hojas podadas.....	32
Figura 11. Peso fresco de tallo de la planta de tomate.....	33
Figura 12. Peso seco de tallo de la planta de tomate.....	33
Figura 13. Diámetro de tallo de la planta de tomate.....	34
Figura 14. Peso fresco de raíz de tomate.....	34
Figura 15. Peso seco de raíz de tomate.....	35
Figura 16. Longitud de raíz de tomate.....	35
Figura 17. Peso fresco de fruto de tomate.....	36
Figura 18. Peso seco de fruto de tomate.....	36
Figura 19. Tamaño de frutos de tomate.....	37
Figura 20. Rendimiento de tomate	38
Figura 21. Radiación solar de dos días.....	39
Figura 22. Radiación fotosinteticamente activa de dos 2 días.....	39
Figura 23. Temperatura del invernadero de dos días.....	39
Figura 24. Humedad relativa de dos días	41
Figura 25. Déficit de presión de vapor de dos días	41
Figura 26. Transpiración de dos días calculada a partir de Jolliet y Bailley (1992), Penman, FAO (1977).....	42

RESUMEN

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN,
FENOLOGÍA Y CRECIMIENTO PARA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN
TOMATE EN INVERNADERO

POR

FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ÁLVARO MORELOS MORENO - ASESOR

Saltillo, Coahuila

Junio, 2021

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es el cultivo más importante debido a la alta demanda en su consumo y producción a nivel mundial. Debido al cambio climático y el uso irracional del agua, se enfrenta su escasez para la producción de los cultivos debido a la falta de conocimiento preciso de los requerimientos de agua por los cultivos. En condiciones protegidas, es posible crear condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos que permitan predecir con precisión las fases fenológicas y la demanda de agua y con ello, optimizar este recurso, aumentar su eficiencia del agua y el rendimiento de los cultivos.

Los modelos de simulación matemáticos son representaciones abstractas de un sistema complejo mediante ecuaciones matemáticas que permiten describir, comprender con precisión desde una perspectiva científica. Es importante generar modelos matemáticos que permitan estimar la evapotranspiración con precisión dentro del invernadero y validarlos bajo esos mismos escenarios para la aplicación del riego en tiempo real de acuerdo a los requerimientos hídricos en función de las condiciones climáticas y etapa fenológica del cultivo.

Se desarrollaron dos ciclos de cultivo de tomate en 2019 y 2020 con el fin de generar un modelo matemático que integre el sistema cultivo-sustrato-agua-ambiente para estimación de la evapotranspiración y el crecimiento del cultivo de tomate para programar los riegos y aumentar la eficiencia del agua en un invernadero tipo túnel, con cubierta plástica semitransparente y ventilas laterales y cenitales.

En el presente estudio se midieron las variables agronómicas, climáticas en el invernadero, propiedades físicas del sustrato y volumen de agua aplicado a las plantas, y se desarrolló un modelo de simulación a partir de una función senoidal en Matlab.

Palabras clave: Modelo de simulación, días julianos, grados-día de crecimiento, riego, sustrato, *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELING OF IRRIGATION AND GROWTH OF
TOMATO GROWN INTO GREENHOUSE CONDITIONS

BY

FREDY GONZÁLEZ HERNÁNDEZ
MASTER OF SCIENCE IN HORTICULTURE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. ÁLVARO MORELOS MORENO - ADVISOR

Saltillo, Coahuila

Junio, 2021

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most important crop due to the high demand in its consumption and production worldwide. Due to climate change and the irrational use of water, it faces its shortage for the production of crops due to the lack of precise knowledge of the water requirements for crops. Under protected conditions, it is possible to create optimal conditions for crop growth that allow accurate prediction of phenological phases and water demand and thereby optimize this resource, increase its water efficiency and crop yield.

Mathematical simulation models are abstract representations of a complex system using mathematical equations that allow to describe and understand accurately from a scientific perspective. It is important to generate mathematical models that allow estimating evapotranspiration with precision within the greenhouse and validating them under the same scenarios for the application of irrigation in real time according to the water requirements depending on the climatic conditions and phenological stage of the crop.

Two tomato cultivation cycles were developed in 2019 and 2020 in order to generate a mathematical model that integrates the crop-substrate-water-environment system to estimate evapotranspiration and growth of the tomato crop to schedule irrigation and increase the water efficiency in a tunnel-type greenhouse, with a semitransparent plastic cover and side and zenith vents.

In the present study, the agronomic and climatic variables in the greenhouse, physical properties of the substrate and volume of water applied to the plants were measured, and a simulation model was developed from a sinusoidal function in Matlab.

Keywords: Simulation model, julian days, growth degree-days, watering, substrate, *Solanum lycopersicum* L.

INTRODUCCIÓN

La agricultura consume el 70% del agua dulce total, por lo cual su escasez es crítica en las zonas áridas y semiáridas (Abdelkhalik *et al.*, 2019). La escasez progresiva del recurso agua se debe al incremento en su demanda, uso irracional y al cambio climático (Giuliani *et al.*, 2018). Los cultivos establecidos en campo abierto pueden sufrir los efectos del cambio climático como estrés hídrico y estrés por altas temperaturas, entre otros, además, se reducirá el periodo de crecimiento de los cultivos (Mo *et al.*, 2017). Bajo ambiente protegido (invernadero) se pueden proporcionar las condiciones óptimas para el crecimiento de un cultivo en combinación con las prácticas agrícolas de manejo se puede aumentar la eficiencia del agua que implica usar menos agua y producir más alimento (Udias *et al.*, 2018).

La estimación correcta de la evapotranspiración (ET) permite conocer los requerimientos hídricos del cultivo durante las diferentes fases fenológicas y mejorar el manejo del agua, por el cambio de volumen y la frecuencia de riego (Tahashildar *et al.*, 2017). La duración de las etapas fenológicas depende de la especie del cultivo, la temperatura del aire, el fotoperiodo y las condiciones del suelo y los nutrientes (Shamshiri *et al.*, 2018).

La sincronización entre el contenido de agua requerida para el crecimiento y la demanda nutricional del cultivo depende de las condiciones ambientales, por lo tanto, un modelo matemático puede permitir un uso eficiente y el suministro adecuado de agua en cultivos en invernadero (Martínez-Ruíz *et al.*, 2019).

La estimación de la evapotranspiración de referencia en los invernaderos es crucial para mejorar la gestión del riego en invernaderos (Jaafar y Ahmad, 2019).

Los modelos matemáticos permiten describir o representar de forma abstracta un determinado fenómeno o realidad (Ferrando *et al.*, 2017), y son una perspectiva científica para determinar la distribución racional y el uso efectivo del recurso agua (Wang y Qin, 2017).

OBJETIVOS

Objetivo General

- Desarrollar un modelo matemático con las variables respuesta de evapotranspiración, fenología y crecimiento, para la programación del riego de tomate cultivado en invernadero.

Objetivos Específicos

- Construir el modelo matemático del sistema de cultivo-sustrato-agua-ambiente.
- Medir y determinar el crecimiento y la evapotranspiración en toda la fenología del cultivo.
- Predecir las tasas de biomasa y área foliar de la planta, el rendimiento del fruto, así como los requerimientos de agua y la programación del riego en todo el ciclo de cultivo.

HIPÓTESIS

El modelo matemático permitirá estimar el volumen y la frecuencia de riego en el cultivo de tomate en invernadero, y los valores altos de riego y proporción del sustrato turba-perlita mejorarán los indicadores de cultivo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Cambio climático

El cambio climático global y la creciente demanda de alimentos son los dos mayores desafíos en los últimos años (Ruggieri *et al.*, 2019). El cambio climático podría afectar negativamente a la agricultura en regiones donde las condiciones climáticas actualmente son buenas para la producción, a decir, 1) disminuir el enfriamiento e inhibir la floración y el cuajado de frutos en cultivos hortícolas, 2) conducir a altas temperaturas y viento durante la floración o maduración que podrían impactar negativamente el cuajado o la calidad del fruto, 3) incrementar las tasas de evapotranspiración (ET) que podrían conducir a déficit de agua y 4) aumentar los problemas de estrés por calor (Snyder, 2017).

El agua

La agricultura es el más grande consumidor de agua dulce disponible del mundo y enfrenta el desafío de alimentar una población creciente con recursos de agua dulce limitado o casi agotado (Neupane y Guo, 2019). El agua juega un papel crucial en la vida de una planta y representa más del 70% en peso de los tejidos vegetales no leñosos (Ruggiero *et al.*, 2017).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2017), el planeta contiene un estimado de 1400 M km³ de agua, del cual solamente el 0.003% es agua dulce, usada para consumo, higiene, agricultura e industria. La producción de alimentos se incrementará más del 50% para el año 2050 y el contenido de agua removida por la agricultura puede incrementar en 10% (FAO, 2017). Un invernadero proporciona un ambiente más controlado, el rendimiento obtenido de la unidad de área es mayor que las condiciones del campo y por esta razón, el cultivo en invernadero se ha incrementado (Karaka *et al.*, 2018).

El tomate

La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 2017) indica que el nombre común conocido en todo el mundo del tomate, tiene su origen en español

asignado a la palabra mexicana en náhuatl “xictomatl” (“xictli”: ombligo y “tomatl”: tomate), que significa tomate con ombligo y se refiere a la cicatriz que deja el pedúnculo en el fruto. El tomate es originario de la región andina de Sudamérica y en América Central (Posada, 2016).

El tomate puede consumirse fresco o procesado en muchos productos diferentes como salsa, zumo, ketchup, conserva, ensalada, encurtido y como tomate cocido en muchas formas (Bibi *et al.*, 2012) y es uno de los cultivos hortícolas más populares producidos en todo el mundo (Zhang *et al.*, 2018), es benéfico para la salud y es buena fuente de provitaminas, β carotenos y vitamina C (Xiukang y Yingying, 2016). En 2019 a nivel mundial la superficie cosechada fue 5.03 M ha con producción de 180.76 M ton (FAOSTAT, 2020).

Factores climáticos que afectan el cultivo de tomate

Radiación solar

Es el principal impulsor de la producción de cultivos, pero la intensidad de la luz también puede tener efectos negativos, especialmente si es concurrente con el estrés hídrico y las altas temperaturas (Ferrante y Mariani, 2018). La luz solar interceptada por un dosel también se correlaciona directamente con el consumo de agua expresado como porcentaje de las necesidades del cultivo de referencia (Ferrante y Mariani, 2018).

El umbral de radiación se refiere al valor mínimo radiación solar global diaria con la que la producción de carbohidratos por fotosíntesis sería suficiente para promover el crecimiento de los cultivos. Perin *et al.* (2018) reportaron que la radiación solar mínima de $3.63 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ para los cultivares de tomate cherry y uva en invernadero, mientras que García-Mendoza (2017) menciona que valores de radiación total diaria de 0.85 MJ m^{-2} es el límite mínimo considerado para la floración y cuajado, siendo preferible mayor iluminación en menor periodo de tiempo que iluminaciones más débiles durante más tiempo. Las necesidades de radiación global mínimas diarias se estiman en $8.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ($2.34 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) (Nisen *et al.*, 1988). Cuando las plantas reciben cantidades excesivas de luz se pueden deshidratar, desarrollar puntos de crecimiento extra, destrucción de la clorofila, y mostrar otros síntomas de estrés (García-Mendoza, 2017).

Humedad relativa

Regula la tasa de transpiración a nivel de las hojas y puede influir en el balance hídrico de los cultivos (Ferrante y Mariani, 2018), en la viabilidad del polen (Harel *et al.*, 2014). Una humedad relativa elevada favorece una baja transpiración que induce un crecimiento temprano de las hojas con menos superficie debido a un aumento de la conductancia estomática y una baja acumulación de calcio (Villanueva-Gutierrez, 2018). Una humedad relativa superior al 85% combinada con una temperatura superior a 30° C se convierten en crítico para el cuajado de los frutos (Villanueva-Gutierrez, 2018).

Déficit de presión de vapor

Es la diferencia entre la presión de vapor saturado y la presión de vapor real a una temperatura determinada que indica el grado de secado atmosférico (McAdam y Brodribb, 2016). Es el parámetro principal para controlar la absorción de agua de la planta en el ambiente del invernadero, que a su vez afecta a otros procesos fisiológicos (polinización, crecimiento y rendimiento); la presión de vapor de agua de saturación aumenta exponencialmente con un aumento en la temperatura del aire (Shamshiri *et al.*, 2018). Los valores adecuados de déficit de presión de vapor en invernadero son de 0.45 a 1.25 kPa, el óptimo es alrededor de 0.85 kPa (Mendoza-Peréz *et al.*, 2020).

Los valores altos de déficit de presión de vapor inhibe la fotosíntesis, que limita el crecimiento del tomate debido a la reducción del área foliar y biomasa y, por tanto, el rendimiento (Zhang *et al.*, 2015). Zhang *et al.* (2020) reportaron que un bajo déficit de presión de vapor promueve significativamente las características de la morfología de la raíz como la longitud, volumen, diámetro, área de superficie, número y proporción de raíces finas.

Temperatura

La temperatura tiene un gran impacto en la producción y acumulación de energía a través de la fotosíntesis en la planta de tomate que posteriormente se transporta a los frutos en desarrollo (Villanueva-Gutiérrez, 2018). Tiene un efecto directo sobre el metabolismo de la planta y las temperaturas bajas o altas pueden reducir el crecimiento o provocar daños en los cultivos (Ferrante y Mariani, 2018).

Las raíces, los frutos, las puntas de los brotes y las flores son sensibles a los cambios de temperatura, mostrando síntomas negativos en condiciones de temperatura extremas (Kawasaki y Yoneda, 2019). El control de la temperatura de la zona radicular mejora el crecimiento y sus actividades fisiológicas asociadas, promoviendo la absorción de agua y nutrientes minerales, que conduce posteriormente a un mayor crecimiento de los brotes (Kawasaki y Yoneda, 2019). El control de la temperatura de las flores mejora la viabilidad del polen y favorece el cuajado de los frutos (Kawasaki y Yoneda, 2019).

Requerimientos climáticos en tomate

La Organización de las Naciones unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2017), indica las condiciones climáticas apropiadas para el cultivo de tomate:

- Temperatura, 19-24 °C en el día y 16-18 °C en la noche.
- Velocidad de aire, menor a 1 m s⁻¹.
- Intensidad de luz, 10000-15000 lux.
- Humedad relativa, 65-75%.
- Concentración de CO₂, 800-1000 ppm en el invernadero en el día.
- pH, 6-7 (Madhavi y Salunkhe, 2004).
- Conductividad eléctrica (CE), 2.5-5 dS m⁻¹ (Putranta *et al.*, 2019).

La duración de las etapas fenológicas depende de la especie del cultivo, la temperatura del aire, el fotoperiodo y las condiciones del suelo y los nutrientes (Shamshiri *et al.*, 2018).

El conocimiento preciso de los requisitos de la planta en diferentes etapas de crecimiento, puede contribuir al diseño de estrategias de control adaptativo para una producción más rentable y competitiva, por lo tanto, es importante considerar las variaciones del clima del invernadero y los requerimientos del cultivo de tomate en las diferentes etapas de crecimiento (Shamshiri *et al.*, 2018).

Sustratos en Horticultura

Los medios de cultivo, "sustratos" o "sustratos de plantas" proporcionan un ambiente de raíz que inicialmente está libre de patógenos de plantas y propiedades que aseguran una adecuada aireación, agua y suministro de nutrientes (Gruda, 2019). Los sustratos para

cultivar plantas se agrupan en sustratos inorgánicos (materiales inertes), tales como arena, vermiculita, perlita, arcilla calcinada, lana de roca y piedra pómez; y sustratos orgánicos como aserrín, turba de musgo, fibra de palma, fibra de coco, cáscara de arroz, residuos de madera, cortezas de los árboles y hojas (Aduhene-Chinbuah, 2018). Las propiedades físicas de los sustratos proporcionan una aireación y retención de agua adecuadas para el crecimiento óptimo de las plantas (Londra *et al.*, 2018), y el rendimiento hidráulico de los sustratos para la producción de plantas hortícolas depende de su capacidad para almacenar, transportar y suministrar agua, aire y nutrientes (Schindler y Müller, 2017). La capacidad de contenedor indica las cantidades de agua y aire del contenedor con sustrato, y es una función de la capacidad de retención de agua y de la altura del contenedor (Schindler y Müller, 2017). El entorno de un contenedor proporciona una capa muy superficial de medio de cultivo que se satura rápidamente durante el riego (Barrett *et al.*, 2016).

Turba de musgo (peat moss)

La turba de musgo es un sustrato inorgánico poroso que presenta una alta capacidad de retención de agua. La retención de agua en el suelo es representada como los niveles de humedad en los puntos de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (10-33-100-625-1100 con la excepción de 1500 kPa) (Markoska *et al.*, 2018).

Dubský y Šrámek (2009) evaluaron diferentes sustratos, y en turba de musgo encontraron a capacidad de contenedor (87 y 44% de humedad a 1 y 5 kPa de tensión, respectivamente), agua fácilmente disponible (42.7% a 1-5 kPa), capacidad de amortiguamiento de agua (2.6% a 5-10 kPa), agua difícilmente disponible (41.5% a 10 kPa), densidad aparente en sustrato seco (105 g L^{-1}), densidad de partícula (1.6 g cm^{-3}) y materia orgánica (85%).

Perlita

La perlita es un sustrato inorgánico, aluminosilicatos expandido de origen volcánico, inerte (baja amortiguación y capacidad de intercambio catiónico), y es uno de los mejores medios de crecimiento para las plantas (Markoska *et al.*, 2018). Las propiedades

de la perlita son las siguientes: pH (6-8.5), densidad aparente (50-500 kg m⁻³), absorción de agua de (200-600% de su masa), humedad (> 1%), y porosidad (70-85%) (Samar y Saxena, 2016).

El agua disponible para la planta representa el agua retenida entre la capacidad de retención de agua y el punto de marchitez permanente; el contenido de agua más allá que las plantas no pueden extraer el agua del sustrato (Szota *et al.*, 2017).

En general, el agua retenida por tensiones superiores a 10 kPa no se considera disponible para el cultivo, y el agua retenida entre 5 y 10 kPa de tensión se denomina capacidad amortiguadora de agua del sustrato (Nikolaou *et al.*, 2019).

Las propiedades hidráulicas como la capacidad de almacenamiento de agua, la capacidad de aire, el comportamiento de contracción, la humectabilidad o la conductividad hidráulica son variables importantes para una evaluación integral del rendimiento de los sustratos hortícolas (Schindler *et al.*, 2017).

Riego de los cultivos

Con las crecientes limitaciones en la cantidad de agua disponible para la agricultura, un objetivo razonable consiste en aumentar la eficiencia del uso del agua de los cultivos, que es la relación entre la masa seca del cultivo y el agua consumida (Bunce, 2016).

Las plantas usan agua en grandes cantidades, el 97% del agua captada por las plantas se pierde en la atmósfera, y solamente el 2% se utiliza para aumentar el volumen o expansión celular (producción de biomasa), y el 1% se destina a procesos metabólicos, principalmente fotosíntesis (Ruggiero *et al.*, 2017). El riego aplicado a los cultivos de hortalizas depende del tipo de cultivo, la densidad de la planta, la etapa de desarrollo, la fuente de agua y las características del suelo; y los tipos de riego pueden ser con aspersores aéreos, goteo, surco o una combinación de los diferentes métodos (Cahn y Johnson, 2017).

Factores que influyen en el requerimiento de agua en un cultivo

De acuerdo con Yu *et al.*, (2019) los factores que influyen en el requerimiento de agua en un cultivo son:

- La especie del cultivo y la etapa de crecimiento.

- La radiación solar, temperatura, humedad relativa, evaporación de la superficie del agua y velocidad del viento.
- La textura y humedad del suelo.

La evapotranspiración (ET) es controlada principalmente por la radiación solar, y en menor grado por la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento (Jensen y Allen, 2016). La temperatura está altamente correlacionada con la radiación solar y la ET.

Programación del riego en invernadero

El manejo del riego de cultivos en invernadero basado en el suelo o en sistemas sin suelo (sustrato), implica la estimación diaria de la evapotranspiración del cultivo, y la cantidad de riego aplicado en intervalos por hora o incluso más cortos, de acuerdo al clima (Nikolaou *et al.*, 2019). En los sistemas sin suelo (sustrato), el riego generalmente comienza una hora después del amanecer y se detiene una hora antes del atardecer, con intervalos de riego cada hora o incluso más cortos en condiciones de alta radiación (Nikolaou *et al.*, 2019).

A pesar de que la frecuencia de riego se puede calcular en función de la radiación acumulada, el umbral de la energía luminosa requiere una evaluación frecuente, como se ve afectado por los cambios en los valores de los coeficientes de cultivo y las técnicas de cultivo (por ejemplo, defoliación) que en cualquier caso, la radiación solar se utiliza solo en sistemas sin suelo (Nikolaou *et al.*, 2019).

La evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) es la pérdida de agua por los estomas de la planta (transpiración) y del suelo (evaporación). La ET controla el intercambio de masa y energía en la atmósfera, y se considera una herramienta útil para el monitoreo del cambio de energía y transferencia de humedad del suelo a la atmósfera. Dos conceptos relacionados con la ET son la evapotranspiración real o de referencia (ET_0), y la evapotranspiración potencial (ETP) (Segura-Castruita y Ortíz-Solorio, 2017).

En las etapas tempranas del cultivo, el agua se pierde principalmente por la evaporación del suelo, pero una vez que la planta presenta un dosel bien desarrollado con cobertura

total en el suelo (área foliar y biomasa), la pérdida de agua se debe principalmente a la transpiración del cultivo. El conocimiento de la evapotranspiración permite comprender y mejorar el entorno de las plantas cultivadas en condiciones de campo abierto y en ambiente protegido, a decir, invernadero (Katsoulas y Stanghellini, 2019).

Evapotranspiración de un cultivo bajo condición estándar

La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), es la ET de un cultivo en condiciones de producción potencial, es decir, exento de enfermedades, niveles óptimos de fertilización y agua, establecimiento en parcelas amplias, óptimas condiciones de suelo, y alcanza la máxima producción de acuerdo al clima (Allen *et al.*, 2006).

$$ET_c = K_c * ET_0$$

Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es la cantidad de agua perdida por el sistema suelo-planta en las condiciones ambientales, edáficas y biológicas existentes (Segura y Ortíz, 2017), y permite conocer el consumo hídrico de los cultivos con precisión y las necesidades hídricas a aportar en forma de riego (Butrón-Mamani, 2017).

Evapotranspiración potencial de cultivo

La evapotranspiración potencial de cultivo (ET_{cp}) representa el valor máximo de la ET de un cultivo con propiedades específicas en condiciones de pleno suministro de agua al suelo, pero que no necesariamente tiene una superficie saturada, como es el caso de la evaporación potencial y la evapotranspiración potencial de una superficie saturada (Jensen y Allen, 2016).

Evapotranspiración de cultivo ajustada

La evapotranspiración de cultivo ajustado (ET_{caj}) es la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo condiciones ambientales y de manejo subóptimas, a decir, la presencia de plagas y enfermedades, salinidad del suelo, baja fertilidad del suelo, y limitación o exceso de agua (García-Solís, 2016).

La ET_{caj} se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico K_s o ajustando K_c a todos los otros tipos de condiciones de estrés y limitaciones ambientales en la ET_c (García-Solís, 2016).

$$ET_{c_{aj}} = ET_0 * K_s * K_{c_{ajustado}}$$

Coefficiente de cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo (K_c) representa la transpiración de la planta y el coeficiente de evaporación diario del suelo (Santos, 2018), integra los efectos de tres características primarias que diferencian un cultivo de una pradera de gramíneas, a decir, altura de cultivo, resistencia y albedo de la superficie suelo-cultivo (García-Solís, 2016). A partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el K_c de un cultivo, se estiman y planifican los volúmenes de agua de riego y la frecuencia de aplicación (Azua *et al.*, 2020) y se utiliza para relacionar ET_c a ET_0 de manera que $ET_c = K_c * ET_0$ (Allen *et al.*, 2006).

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

donde el K_c consiste de dos coeficientes, uno para la transpiración del cultivo o coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y otro para la evaporación del suelo (K_e).

Dirirsa *et al.* (2017) obtuvieron los coeficientes de cultivo (K_c) en tomate de 0.57, 0.86, 1.13 y 0.88 para los estados inicial, de desarrollo, estación media y estación tardía, correspondientes a los 14, 25, 36 y 29 días de duración de cada fase fenológica.

Métodos para estimar la ET

Los métodos convencionales para estimar la ET en campo abierto son los siguientes: gravimetría, sonda de neutrones, reflectometría en tiempo real, capacitancia, FDR, técnicas tensiométricas, técnicas higrométricas. El método gravimétrico es preciso y barato, pero es destructivo, lento y requiere mucho tiempo, por lo que su aplicación es limitada (Kumar-Sharma *et al.*, 2018). Existen otras técnicas convencionales para medir la evapotranspiración, tales como la covarianza de Eddy, tasa de Bowen, lisímetro de pesaje, y estimación del flujo de savia del tallo, pero son limitadas a pequeña escala (Hou *et al.*, 2019).

Tabla 1. Clasificación de los métodos para estimar la ET (García-Solís, 2016).

Tipo	Método, autor
Métodos empíricos	Thornthwaite, 1948
	Blaney-Criddle, 1950
	SCS Blaney-Criddle, 1970
	Blaney-Criddle (FAO-24), 1977
	Atmómetros
Métodos empírico-teóricos	Makkink, 1957
	Jensen-Haise, 1963, 1974
	Método de radiación (FAO-24), 1977
	Tanque evaporímetro
Métodos teórico-empíricos	Penman, 1948, 1952
Métodos teóricos	Balance de energía, o relación de Bowen
	Ecuación de Penman-Monteith
	Correlación de turbulencia

Estimación de la ET en invernadero

La evapotranspiración de referencia (ET_0) es un método poco estudiado debido a que requiere la disponibilidad de datos meteorológicos de calidad, y en condiciones de invernadero se conoce muy poco de su comportamiento (Butrón-Mamani, 2017). El microclima del invernadero depende de su diseño e infraestructura, lo cual afecta los procesos biofísicos, incluida la transpiración del dosel de las plantas (Katsoulas y Stanghellini, 2019).

La predicción de las tasas de transpiración permite estimar el balance hídrico del suelo y en consecuencia, el desarrollo y crecimiento de las plantas. En su mayoría, la predicción del uso del agua del dosel vegetal se basa en enfoques meteorológicos empíricos (Sinclair y Ghanem, 2020).

Ecuación de Penman-Monteith

La ecuación de Penman-Monteith es un método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de la temperatura del aire, la velocidad

del viento, la humedad relativa y la radiación solar (Lang *et al.*, 2017). Según Allen *et al.* (2006), la ecuación de Penman-Monteith adaptada a invernadero es la siguiente:

$$ET_0 = \frac{0.408 * \Delta (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} U_2 * (e_s - s_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34U_2)}$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), Δ la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n la radiación neta en la superficie del césped ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G el flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), γ la constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), U_2 la velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1}), T la temperatura media diaria del aire ($^\circ\text{C}$), e_s la presión del vapor de saturación (kPa), s_a la presión real de vapor (kPa).

Debido al requerimiento de datos meteorológicos precisos, la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith para estimar la ET está limitada en muchas regiones (Lang *et al.*, 2017). A causa de la dificultad en la medición directa de la ET, se han desarrollado numerosos modelos para su estimación, sin embargo, estos son muy complejos y requieren de la medición y estimación de muchos parámetros, que los hace sean de difícil aplicación (García, 2016).

Ecuación de Priestley-Taylor

La ecuación de Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) es un método estándar para estimar la evapotranspiración potencial diaria (ET_0), y cuya aplicación en invernadero ha mostrado resultados con buena precisión.

$$ET_0 = a_{pt} \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} (R_n - G)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1}), λ el calor latente de vaporización (MJ kg^{-1}) y $a_{pt} = 1.26$ el coeficiente de advección.

La luz solar interceptada por el dosel es un factor fundamental del consumo de agua en las necesidades de los cultivos, como se expresa en la ecuación de Priestley-Taylor para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) sobre la base de la radiación neta (Ferrante y Mariani, 2018).

Ecuación de Jolliet-Bailey

Jolliet y Bailey (1992) evaluaron el efecto del clima (velocidad del aire, déficit de presión de vapor, radiación solar y CO₂) en la transpiración, utilizaron cinco modelos de simulación y obtuvieron resultados importantes, a decir, la tasa de transpiración aumenta linealmente con la radiación solar, el déficit de presión de vapor del aire y la velocidad del aire, mientras que la temperatura del aire, la concentración de CO₂ y la temperatura de la tubería no afectan significativamente.

Jolliet y Bailey (1991) evaluaron la transpiración (E_{at} [mg m⁻² s⁻¹]) en tomate cultivado en invernadero mediante análisis de regresión lineal múltiple, a partir de la radiación solar global incidente dentro del invernadero (I_{in} [W m⁻²]), el déficit de presión de vapor del aire (Δ_a [kPa]) y la velocidad del aire dentro del invernadero (u [m s⁻¹]), con las siguientes ecuaciones:

Condiciones	Ecuación	Eficiencia
Túnel de viento, febrero, 103 h medidas	$E_{at} = 0.089I_{in} + 1.54\Delta_a + 1.46u$	R ² = 0.90 SE = 1.1 mg m ⁻² s ⁻¹
Invernadero, mayo, 163 h medidas	$E_{at} = 0.207I_{in} + 16.1\Delta_a$	R ² = 0.99 SE = 4.5 mg m ⁻² s ⁻¹
Invernadero, junio-julio, 171 h medidas	$E_{at} = 0.141I_{in} + 28.1\Delta_a$	R ² = 0.87 SE = 9.7 mg m ⁻² s ⁻¹

Jolliet y Bailey (1992) encontraron en un cultivo joven incrementos de la transpiración en 0.09 mm día⁻¹ al aumentar la radiación solar en 1 MJ m⁻² día⁻¹, e incrementos de la transpiración en 0.013 mm día⁻¹ al aumentar el déficit de presión de vapor en 0.1 kPa.

Los modelos de evapotranspiración de referencia (ET₀) se diferencian en sus procedimientos de cálculo, ajuste local, y la cantidad y calidad de la adquisición de datos para estimaciones precisas (Olberz *et al.*, 2018).

La estimación de la evapotranspiración de referencia dentro de los invernaderos es útil para mejorar la gestión del riego en invernaderos (Jaafar y Ahmad, 2019). Wang y Qin (2017) concluyeron que los modelos matemáticos son una perspectiva científica para determinar la distribución racional y el uso efectivo del recurso agua en el futuro.

Crecimiento del cultivo de tomate

El crecimiento se caracteriza como un aumento permanente de tamaño y volumen, y como resultado de la diferenciación y distribución de las plantas (Kamatchi y Parvathi, 2020).

El crecimiento de un cultivo u órgano se calcula a lo largo del tiempo, lo que desempeña un papel muy importante (Almanza-Merchán *et al.*, 2016). Sin embargo, cuando se calcula desde el punto de vista cronológico neto (horas, días, años, etc.) (Figura 1), esto no demuestra directamente el comportamiento del crecimiento de las plantas o de algunos órganos vegetales desde el punto de vista biológico porque no se tienen en cuenta factores como la temperatura (Almanza-Merchán *et al.*, 2016).



Figura 1. Crecimiento del cultivo de tomate a través del tiempo.

El crecimiento del cultivo es afectado en gran medida por la temperatura, radiación y tipo de cultivo u hortaliza, y presenta una curva expo-lineal.

La tasa relativa de crecimiento (rm) es el cambio de la biomasa por unidad de biomasa inicial por unidad de tiempo ($g\ g^{-1}\ día^{-1}$), es el mejor indicador del crecimiento en las etapas tempranas de desarrollo del cultivo, es afectado por la temperatura, y define la parte exponencial del crecimiento.

La tasa absoluta de crecimiento (cm) indica el cambio de la biomasa por área por unidad de tiempo ($g\ m^{-2}\ día^{-1}$), es el mejor indicador del crecimiento en las etapas cuando el área foliar y la biomasa del dosel están bien desarrollados, es afectado por la radiación, y define la parte lineal del crecimiento (Goudriaan y van Laar, 1994).

La luz es uno de los factores que más limitan el crecimiento de las plantas en los invernaderos (Yan *et al.*, 2018). La eficiencia del uso de la luz se expresa en función de la concentración de CO_2 durante el día (Saito *et al.*, 2020).

Fenología del cultivo de tomate

La fenología del cultivo es un parámetro que indica la duración de los estados de desarrollo de los cultivos (germinación, aparición de cotiledones y hojas verdaderas, desarrollo vegetativo, antesis o floración, formación y maduración de fruto) y permite monitorear el crecimiento de los cultivos, predecir el rendimiento y su simulación (Huang *et al.*, 2019).

Tabla 2. Fenología del cultivo de tomate (Benton-Jones, 2007).

Estado	Estado de desarrollo	Largo de estado (días)
0	Germinación a hojas iniciales	25-35
1	Vegetativo	20-25
2	Floración	20-30
3	Formación de fruto	20-30
4	Maduración de fruto	15-20
		Total = 100-140

Grados-día de crecimiento

Los cultivos requieren de cierta cantidad de calor acumulado para pasar de un estado de crecimiento a otro, esto se refiere a tiempo fisiológico (Pathak y Stoddard, 2018). La determinación de los requerimientos de calor en las primeras fases de desarrollo de las plantas se ha expresado como grado días de crecimiento (GDD) (Paparrizos y Matzarakis, 2017).

Los grados-día de crecimiento (GDD) pueden ser usados como un indicador agroclimático, porque los modelos de simulación pueden traducir tendencias climáticas complejas y proyecciones dentro de indicadores agrícolas para los productores (Pathak y Stoddard, 2018). Los modelos de grados-día de crecimiento son combinaciones matemáticas de diferentes umbrales de temperatura, y permiten calcular las unidades calor acumuladas para relacionar los cultivos a tiempo fisiológico (Pathak y Stoddard, 2018).

Pathak y Stoddard (2018) evaluaron la duración de la estación de crecimiento y los días a madurez en tomate en varias fechas de plantación y encontraron que el tiempo

necesario para alcanzar la madurez fisiológica varió entre 104 y 118 días, y 1214 °D acumulados.

Mendoza-Pérez *et al.* (2018) determinaron los GDD acumulados en tomate cultivado en invernadero para diferentes fases de desarrollo: inicial (697 °D), vegetativo (951 °D), desarrollo (1268 °D), producción (1698 °D) y fin de ciclo (1762 °D).

Modelos matemáticos

Los científicos definen un modelo de diferentes maneras, a decir, a) es una representación esquemática de la concepción de un sistema agrícola o un conjunto de ecuaciones que representa el comportamiento de un sistema, b) es una representación de un objeto, sistema o idea en una forma distinta a la de la propia entidad, con el objetivo de ayudar a explicar, comprender o mejorar el funcionamiento del sistema (Tripathi y Kumar, 2015).

Los modelos matemáticos utilizan ecuaciones diferenciales, representaciones simbólicas o esquemas, objetos, algoritmos y procedimientos matemáticos (Ferrando *et al.*, 2017).

Cervantes-Gómez (2015) menciona el proceso de la modelización matemática a través de cuatro principales etapas, a decir, 1) estudio de la situación real, 2) elaboración del modelo matemático, 3) solución del modelo, y 4) validación del Modelo.

La modelización nos ayuda a comprender, predecir y controlar un sistema de una manera más organizada o metodológica, ya que los modelos proporcionan una descripción cuantitativa del sistema y una forma de reunir los conocimientos sobre las partes para ofrecer una visión coherente y holística del sistema, además, pueden ayudar a identificar las áreas en las que faltan conocimientos y pueden ayudar a estimular nuevas ideas o enfoques para la investigación (Manikandan y Vethamoni, 2017).

Con la creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de las ciencias de la computación, se otorgan nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas y áreas de diseño y manejo de la industria (Rodríguez-González *et al.*, 2018). El uso de software permite realizar simulaciones bajo diferentes escenarios, lo que ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento y las consecuencias de múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo (Jaimes-Gualdron, 2016).

Modelos matemáticos en la agricultura

El uso de los modelos de simulación en la agricultura constituye una herramienta para la investigación, así como para los productores y asesores técnicos (Rodríguez-González *et al.*, 2018).

El modelo de simulación de cultivos imita el comportamiento de un cultivo real mediante la predicción del crecimiento de sus componentes, a decir, hojas, raíces, tallos, granos y frutos (Manikandan y Vethamoni, 2017). Los modelos de cultivo de producción potencial simulan el crecimiento de la planta bajo condiciones biofísicas no limitadas, a decir, agua y fertilizantes, y limitadas solamente al clima al que están expuestas las plantas (Gil *et al.*, 2017).

Un modelo de simulación de un cultivo además de predecir el rendimiento y la producción del cultivo, proporciona información cuantitativa sobre los principales procesos que intervienen en el crecimiento y desarrollo del cultivo (Manikandan y Vethamoni, 2017). Para predecir adecuadamente el rendimiento del cultivo, los modelos de simulación deben ser construidos y adaptados de acuerdo a las condiciones locales (Gil *et al.*, 2017), y de forma similar para la predicción del rendimiento de los cultivos en invernadero, los modelos también deben ser construidos para su aplicación en escenarios específicos, donde el nivel tecnológico del invernadero garantice la homogeneidad (no cambio) de su entorno y obtener de esta forma una alta precisión en los resultados (Lin *et al.*, 2019).

Para el análisis cuantitativo del crecimiento de las plantas se utilizan medidas directas de crecimiento, como el peso seco, el área foliar y el tiempo, y se calculan otros indicadores, a decir, tasa relativa de crecimiento, tasa máxima de crecimiento, tasa de asimilación neta, índice de área foliar (San Martín-Hernández *et al.*, 2016).

La falta de modelos de crecimiento de cultivos establecidos en ambiente protegido y en consecuencia el control no-satisfactorio del microclima en los invernaderos, han conducido a obtener incrementos no-significativos del rendimiento de los cultivos (Lin *et al.*, 2019).

La modelación matemática de cultivos permite seleccionar distintos ambientes de simulación y analizar la respuesta de diversas variables en el tiempo para estimar, predecir y potencializar el crecimiento de un cultivo (Mancilla-Morales *et al.*, 2019). Al

combinar los conocimientos de varios modelos de forma novedosa, el espacio de diseño se amplía y permite encontrar modelos que se adaptan potencialmente mejor a la aplicación que los modelos originales (Kuijpers *et al.*, 2019).

Ventajas de los modelos matemáticos en la agricultura

Kaur y Singh (2020) mencionan que el enfoque de la modelización puede proporcionar muchos beneficios, a decir, a) gestión del sistema de cultivo, tasa de siembra, riego, fertilizante, b) predicción y análisis del rendimiento, c) útiles para solucionar problemas prácticos en la agricultura, d) útiles en la conservación de recursos, y en estudios de agricultura de precisión, e) evaluación del cambio climático, predicción de los impactos en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, y planear estrategias de adaptación para minimizar los impactos negativos.

Limitaciones de los modelos matemáticos en la agricultura

Kaur y Singh (2020) mencionan las limitantes del uso de modelos de cultivos, a decir, a) proyecciones inexactas de los procesos naturales, y poco fiables y poco realistas de los cambios en la variabilidad del clima, b) uso incorrecto de los modelos, resultados inadecuados para una parcela heterogénea, c) rendimiento del modelo limitado a la calidad de los datos de entrada, inexactitud de los datos observados debido a errores de muestreo, d) datos no-precisos del cultivo, suelo y clima, o procedentes de otros lugares, y en consecuencia una validación rudimentaria del modelo, e) todo sistema biológico es muy complejo, por lo cual no se puede desarrollar un modelo de cultivo ideal.

Antes de ser utilizado, un modelo debe ser validado, es decir, el resultado del modelo después de ejecutarlo con los datos de entrada históricos registrados para el sistema real, es comparado con el resultado del sistema real (Manikandan y Vethamoni, 2017).

Modelos matemáticos de evapotranspiración y crecimiento en tomate

HortSyst. Es un modelo de tiempo discreto para describir la dinámica del tiempo fototérmico, la producción total de materia seca, la absorción de N, el índice de área foliar y la evapotranspiración para cultivos en invernadero (Martínez-Ruiz *et al.*, 2019).

Este modelo fue desarrollado 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 (Martínez-Ruíz *et al.*, 2019).

VegSyst. Este modelo simula la producción total de materia seca, absorción de N y evapotranspiración diaria del cultivo. La materia seca es calculada en función del tiempo térmico o fracción diaria de la radiación fotosintéticamente activa, y el uso eficiente de la radiación (Gallardo *et al.*, 2018). Mancilla-Morales *et al.* (2019) utilizaron el modelo VegSyst y propusieron ecuaciones basadas en el modelo expo-lineal y logístico que permite simular, evaluar y estimar variables de crecimiento de cultivo de tomate y contenido de N en planta, con una precisión de 95%.

TOMGRO. Es un modelo de crecimiento del tomate propuesto por Jones *et al.* (1998), que estudia la relación entre el crecimiento del tomate y el clima del invernadero, a decir, radiación solar, temperatura y CO₂, para gestionar y predecir científicamente todo el proceso de crecimiento del tomate (Lin *et al.*, 2019).

Perspectivas a futuro sobre el uso eficiente del agua en agricultura

La estimación de la evapotranspiración de referencia en los invernaderos es crucial para mejorar la gestión del riego en invernaderos (Jaafar y Ahmad, 2019). Wang y Qin (2017) mencionan que los modelos matemáticos son una perspectiva científica para determinar la distribución racional y el uso efectivo del recurso agua en el futuro.

La sincronización perfecta entre el contenido de agua requerida para el crecimiento y la demanda nutricional del cultivo depende de las condiciones ambientales, por lo tanto, un modelo matemático puede permitir un uso altamente eficiente del suministro de agua en cultivos en invernadero (Martínez-Ruíz *et al.*, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo en un invernadero tipo túnel, con cubierta plástica semitransparente y ventilas laterales y cenitales, en el Departamento de Horticultura, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (25° 21' Latitud Norte y 101° 02' Longitud Oeste, altitud 1742 m). Se realizaron dos ciclos de cultivo, 2019 y 2020.

Como material vegetal se utilizó semilla de tomate tipo saladette híbrido El CID F1 (Harris Moran®), con hábito de crecimiento indeterminado.

Densidad aparente de sustrato

Se llenó un contenedor de volumen conocido (cm^3) con sustrato seco en las proporciones indicadas (v/v) y se pesó la masa (g), con 3 repeticiones por tratamiento y se calculó la densidad del sustrato (g cm^{-3}) con la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

Manejo agronómico de cultivo

Trasplante del cultivo

El trasplante de las plántulas se realizó a los 40 días después de la siembra, en bolsas negras de polietileno de 8 L con sustrato turba-perlita en tres mezclas, a decir, 100:0, 66:33 y 50:50 (v/v). La separación entre plantas fue de 33 cm y entre hileras de 1 m (3 plantas m^{-2}).

Riego y Fertilización

Las plantas fueron fertilizadas con solución nutritiva tipo Steiner (Steiner, 1961) diluida en el agua de riego en concentraciones acordes a la fenología del cultivo: 25% inicio de crecimiento vegetativo (germinación), 50% crecimiento vegetativo (trasplante), 75% floración y amarre de frutos, y 100% llenado de frutos y cosecha. La frecuencia de aplicación de los riegos fue de un riego por día a las 18:00 h.

Se utilizó un sistema de riego dirigido con regulación de presión para cada contenedor de planta (depósito de solución nutritiva, bomba sumergible, manguera de 16 mm, distribuidor, tubín de polietileno de 5 mm y goteros tipo estaca).

Labores de cultivo

El cultivo se llevó a un solo tallo, se realizó el tutoreo de plantas, la poda de tallos laterales (brotes laterales), poda de hojas viejas y frutos, dejando de 5-6 frutos por racimo. Se realizaron aplicaciones de insecticidas y fungicidas para el control de plagas (Abamectina, imidacloprid, lambda cyhalotrina y extractos botánicos) y enfermedades (Captan).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3x3 con 3 repeticiones. Los dos ciclos consistieron de 9 tratamientos, con 12 y 10 plantas por tratamiento (108 y 90 plantas) en el primer ciclo y el segundo ciclo, respectivamente.

Distribución de los tratamientos

Se utilizaron tres niveles de disponibilidad de agua (100, 75, 50%) y tres mezclas de sustrato turba-perlita (100:0, 66:33 y 50:50 v/v) (Tabla 3).

Tabla 3. Distribución de los tratamientos.

Tratamiento	Humedad (%)	Sustrato (v/v)
1	100	100:0
2	100	66:33
3	100	50:50
4	75	100:0
5	75	66:33
6	75	50:50
7	50	100:0
8	50	66:33
9	50	50:50

Tiempo de riego aplicado al cultivo

Para determinar el consumo de agua aplicada en el cultivo de tomate, se utilizó una maceta elegida al azar en cada tratamiento (humedad de sustrato + proporción de sustrato). El volumen de agua aplicada ($L s^{-1}$) se midió en el emisor (gotero) del sistema de riego con una probeta durante 1 min en la maceta seleccionada de cada tratamiento. Se realizaron mediciones de volumen de agua aplicado y el tiempo de riego (Tabla 3) para determinar el aumento de volumen de agua en cada tratamiento durante el ciclo de cultivo.

Tabla 4. Tiempo de riego aplicado en las etapas de crecimiento del cultivo de tomate.

Proporción turba-perlita (v/v)	Tiempo de riego (min)		
	Etapas vegetativa	Floración	Fructificación
100:0	12	17	23
66:33	16	29	35
50:50	14	28	45

Desarrollo de la fase agronómica

Medición del clima del invernadero

Se instaló una estación climática (Spectrum Technologies Inc.) en el invernadero para medir las variables climáticas cada 15 min, que incluye un sensor piranométrico de silicón SP03670I para radiación solar ($W m^{-2}$), sensor de luz quantum SP03668I para radiación fotosintéticamente activa ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$), sensor SP03667S para temperatura del sustrato ($^{\circ}C$), sensor WaterScout SP06460-20 para humedad del sustrato (%), registrador de datos A160 - Temp./HR/ CO_2 con sensor para concentración de CO_2 (ppm), temperatura del aire ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%), registrador de datos WatchDog 1650, software Spec 9 Pro SP03654P9 para la programación de las mediciones en un computador.

Grados-día de crecimiento (GDD)

Los grados-día de crecimiento (GDD) fueron calculados en todo el ciclo del cultivo, a partir del trasplante hasta la cosecha con la siguiente ecuación (Arnold, 1959).

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{Tmax_i + Tmin_i}{2} \right) - Tb \right]$$

donde *GDD* son los grados-día de crecimiento (°D), *Tb* la temperatura base (*Tb* = 6.1 °C en tomate), *Tmax* y *Tmin* las temperaturas diarias máximas y mínimas (°C).

El cálculo de los GDD se basa en la acumulación de temperatura diaria del aire (Ojeda *et al.*, 2006) dentro del invernadero a partir del trasplante, con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} GDD &= Ta - Tcmin && \text{si} && Ta < Tcmax \\ GDD &= Tcmax - Tcmin && \text{si} && Ta \geq Tcmax \\ GDD &= 0 && \text{si} && Ta \leq Tcmin \end{aligned}$$

donde *Ta* es la temperatura diaria promedio (°C); *Tcmin* y *Tcmax* son las temperaturas críticas mínimas y máximas (°C), en las cuales se inhibe el crecimiento de la planta.

También fueron calculadas las tasas de transpiración a partir de la temperatura, humedad relativa y radiación solar, medidas en el invernadero.

Altura de planta y número de hojas

Cada semana se midió la altura de planta (cm) desde la base de la planta hasta la yema apical de las plantas, y se cuantificó el número de hojas completamente desarrolladas.

Peso fresco y peso seco de hojas

Se realizaron cuatro podas de hojas abajo del racimo con frutos bien formados, se cuantificaron, se registró el peso fresco, se colocaron en bolsas de papel y se deshidrataron en una estufa de secado durante 48 h a una temperatura de 60 °C. Se pesaron las hojas para obtener el peso seco para obtener la biomasa de hojas.

Diámetro, peso fresco y peso seco de tallos

Al final del ciclo de cultivo, se midió el grosor del tallo (mm) a 1.3 m de altura en todas las plantas. Los tallos se cortaron en trozos, se registró el peso fresco de tallo de cada planta (g), se colocaron en una bolsa de papel y se llevó a la estufa de secado durante 48 h a una temperatura de 60 °C. Después de 48 h, se pesó para obtener el peso seco de tallo (g).

Longitud, peso fresco y peso seco de raíces

Se midió la longitud de raíces (cm) desde la base hasta donde se encuentra la mayor proporción de raíces en todas las plantas. Durante la limpieza de las raíces, se obtuvo el peso fresco de raíces oreadas (g) y se llevó a la estufa de secado a 60 °C durante 2 días, después, se pesó nuevamente para obtener el peso seco de raíces.

Rendimiento

Al momento de la cosecha, se colectaron los frutos maduros por planta y fueron pesados (g) para obtener el rendimiento por cada tratamiento.

Tamaño, peso fresco y peso seco de frutos

Se midió el diámetro polar y ecuatorial (mm) de los frutos cosechados en la etapa de maduración de rojo claro (color 4) a rojo maduro (color 5). Se seleccionó un fruto en cada tratamiento, se registró el peso fresco de fruto (g), se cortó en trozos para colocarlo en una bolsa de papel y se llevó a la estufa de secado durante 48 h a una temperatura de 60 °C. Después de 48 h se pesó para obtener el peso seco de frutos (g). Las muestras de fruto se realizaron durante toda la etapa de cosecha, concluyendo en el 4to y 5to racimo.

Modelo de simulación matemática

El tiempo de simulación: tiempo inicial (t_{ini}) y tiempo final (t_{fin}) se calculó en días julianos (d_j) con el código `datenum(año, 1:12, 1)` en Matlab, el cual proporciona los días acumulados desde el día 01 del año 0 hasta el día 01 de cada mes del año que se desea muestrear.

$$d_j = \frac{\text{Días acumulados}}{\text{hasta el 1 del mes}} + \frac{\text{Días del}}{\text{mes}} - \frac{\text{Días acumulados}}{\text{hasta el 1 de enero}}$$

El consumo del agua de riego (CAR) en cada intervalo de riego fue obtenido a partir de un modelo de simulación construido en Matlab, el cual utiliza una ecuación senoidal cuya amplitud está relacionada con el volumen diario de riego (VR) y la longitud con la frecuencia de riego, que en este caso es un riego diario a las 18:00 h, en función del

tiempo (*time*) en días julianos desde el trasplante (08 de agosto de 2020, 193 día juliano)
al 3er corte de cosecha (08 de diciembre de 2020, 333 día juliano):

$$CAR = -VR * \sin (\pi * (\text{mod}(\text{time}(i) + 0.25, 1) * 24 - 6) / 12)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad de sustrato

En cultivos sin suelo, el volumen de la raíz es pequeño y la cantidad de agua disponible para la planta es baja, por lo que el sistema no puede amortiguar los errores en la aplicación del agua (Salcedo *et al.*, 2017). El entorno de un contenedor proporciona una capa muy superficial de medio de cultivo que se satura rápidamente durante el riego (Barretta *et al.*, 2016).

Al preparar la mezcla con turba de musgo (densidad de 0.2323 g cm^{-3}) y perlita (densidad de 0.125 g cm^{-3}), se obtuvieron densidades de 0.1787 y 0.1958 g cm^{-3} en las proporciones turba-perlita de 50:50 y 66:33 (v/v), respectivamente, las cuales fueron las utilizadas en este trabajo (Figura 2). Se obtuvo la siguiente ecuación que presentó un comportamiento lineal para calcular la densidad del sustrato:

$$ds = 0.0010733 * pt + 0.125 \quad \begin{cases} pt + pp = 100 \\ pp = 100 - pt \end{cases}$$

donde ds es la densidad del sustrato (g cm^{-3}), pt la proporción de turba (% vol), pp la proporción de la perlita (% vol).

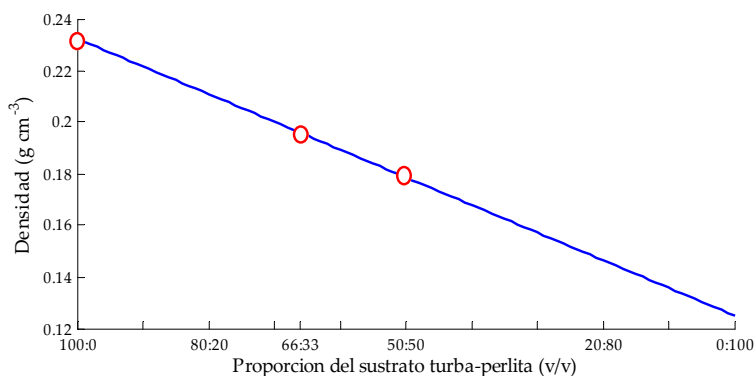


Figura 2. Proporción de sustrato y la densidad de sustrato.

Volúmenes de riego aplicado

En general, todas las prácticas de riego que explícitamente intentan evitar el estrés hídrico en la producción sin suelo se limitan a un rango de potencial mátrico de 0 a -8 kPa (Gohardoust *et al.*, 2020). El riego aplicado a partir del trasplante fue de 1.0 L por planta por día para el nivel de riego de 100%, y se incrementó en 50% (0.5 L) a las 2

semanas y al inicio de la floración, y se hizo lo mismo con los riegos de 75 y 50% (Figura 3).

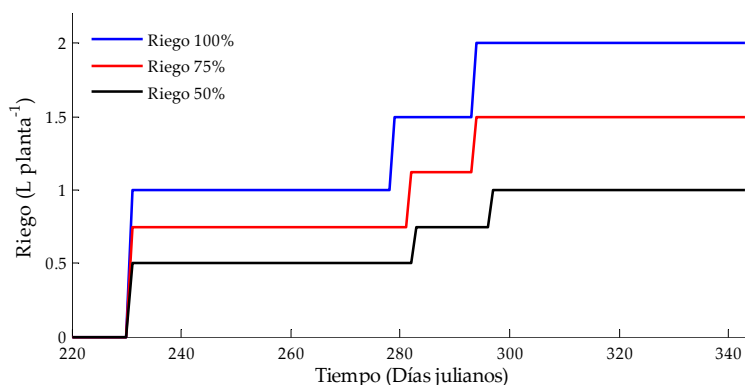


Figura 3. Riego aplicado a tomate.

La Tabla 5 muestra los volúmenes acumulados de riego por planta y el rendimiento obtenido de fruto fresco por unidad de volumen de agua aplicado para tres niveles de riego.

Tabla 5. Productividad o rendimiento obtenido por unidad de volumen de agua aplicada.

Riego (%)	Volumen de riego (L planta ⁻¹ día ⁻¹)	Volumen acumulado de riego (L planta ⁻¹)	Productividad (kg m ⁻³) rendimiento/agua
100	1.0 – 2.0	170.5	7.9 - 11.8
75	0.75 - 1.5	126.75	8.5 - 19.7
50	0.5 – 1.0	83.5	9.5 - 14.0

Flores *et al.* (2007) reportaron que los valores experimentales de requerimientos de riego del tomate varían de 200 mL planta⁻¹ en la etapa inicial, hasta 1500 mL en la etapa de máxima demanda, y un volumen acumulado por planta de 110 L, con una productividad de 35 kg m⁻³ de agua bruta aplicada y un rendimiento de 20 kg m⁻². Lekhpal *et al.* (2020) encontraron que los valores de ET para la etapa inicial, etapa de desarrollo, etapa de media estación y la etapa de la última estación fueron: 52.38, 75.07, 72.27, 44.98 mm en tomate cultivado sobre turba de coco en condiciones protegidas. Los mismos autores encontraron que el total de necesidades hídricas estacionales fue 244.71 mm.

La Figura 4 indica el volumen acumulado durante el crecimiento del cultivo, el cual alcanzó un volumen total de 83.5, 126.75 y 170.5 L por planta por ciclo para los niveles de riego de 50, 75 y 100%, respectivamente.

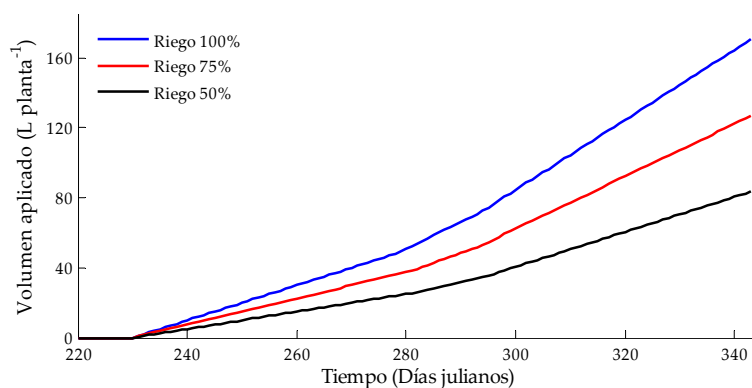


Figura 4. Volumen de agua acumulado.

Somnuek *et al.* (2020) estimaron la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) del tomate y pimiento en invernadero utilizando el modelo de Penman-Monteith; sus resultados indicaron que la necesidad de agua del tomate se situó entre 100 y 1200 mL día⁻¹ y el riego real del cultivo es mayor que el riego necesario del cultivo después de 60 días después de trasplante hasta el final del cultivo aproximadamente 400 mL día⁻¹ en tomate.

Simulación del consumo del agua de riego

La Figura 5 indica la simulación del consumo de agua en el cultivo de tomate durante las etapas de crecimiento con una función senoidal.

Los riegos fueron aplicados diariamente a las 18:00 h, y se incrementaron en dos ocasiones de acuerdo a la fenología del cultivo. El modelo simula el consumo del agua de riego por la planta, el cual disminuye a un nivel de amortiguamiento (0 L de riego) y queda una cantidad remanente antes de alcanzar el nivel de abatimiento, en el cual la planta ya no se recupera y muere. Más allá del volumen de agua aplicado diariamente, se encuentra la humedad máxima que puede retener el sustrato, o capacidad de contenedor.

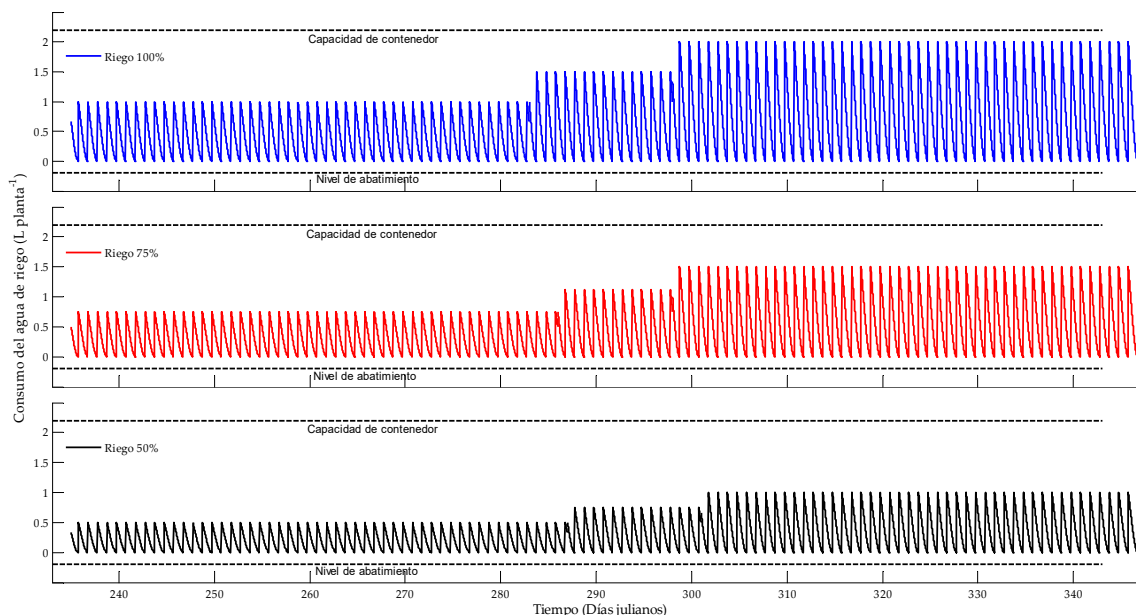


Figura 5. Simulación del consumo del agua de riego con una función senoidal.

AlShrouf (2017) menciona que en sistema de cultivo sin suelo abierto es posible obtener ahorro de agua de riego en 80%, ahorro de fertilizantes en 55%, incremento de la productividad en 100% y productividad del agua en 1000%.

La simulación del crecimiento, la biomasa y el rendimiento de los cultivos es posible a partir de la evaluación de las diferentes fases de crecimiento y desarrollo (Saqib y Anjum, 2021).

Estados de desarrollo del cultivo

Se representan los estados de desarrollo de dos ciclos de cultivo realizados durante los años 2019 y 2020, las variables estudiadas fueron evaluadas durante el segundo ciclo (Figura 6). La fecha de trasplante de los dos ciclos de cultivo hay una diferencia de 1 día, además, no hay diferencia significativa en las fases fenológicas y al inicio de la cosecha del cultivo.

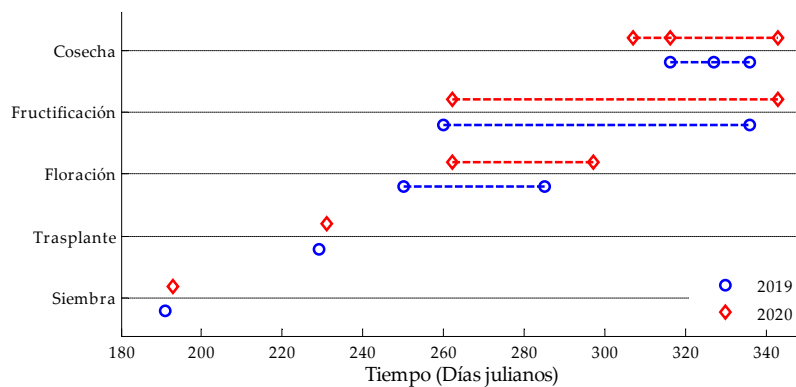


Figura 6. Etapas fenológicas en dos ciclos de cultivo.

VARIABLES DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO

Altura de planta y número de hojas

El cultivo alcanzó la mayor altura (Figura 7) y el mayor número de hojas (Figura 8) al incrementar el volumen de riego (100 > 75 > 50%) y la proporción turba-perlita (100:0 > 66:33 > 50:50 (v/v)).

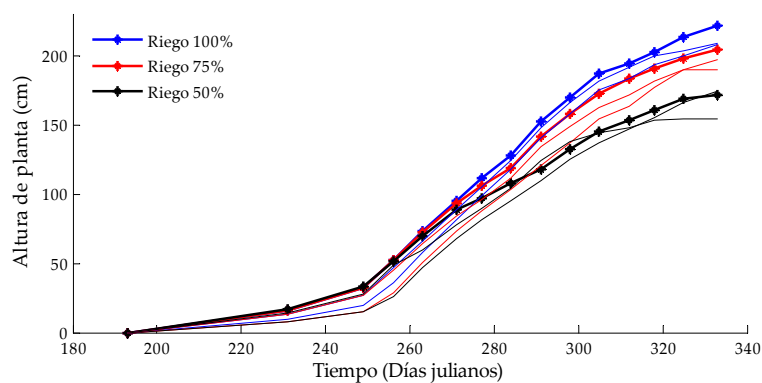


Figura 7. Altura de la planta.

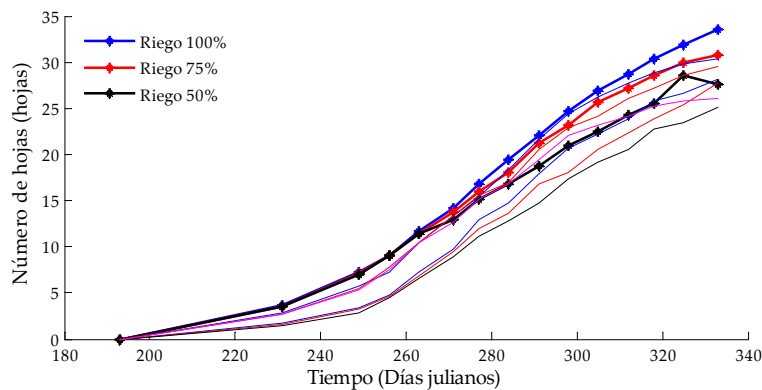


Figura 8. Número de hojas de la planta.

Peso fresco y seco de hojas

Para cada volumen de riego aplicado, se calculó el peso fresco de hojas por planta (PFH_{pl}) y el peso seco de hojas por planta (PSH_{pl}), a partir de la cantidad promedio de hojas por planta (NH_{pl}) y los coeficientes promedio del peso fresco/número de hojas podadas (PFH_{poda}/NH_{poda}) y del peso seco/número de hojas podadas (PSH_{poda}/NH_{poda}), respectivamente, de cuatro cortes de las hojas inferiores al racimo con frutos cuajados (Figura 9 y 10):

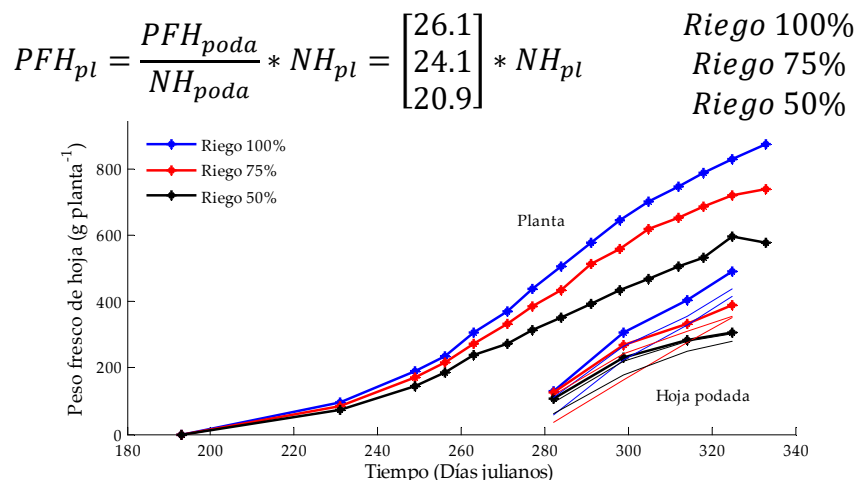


Figura 9. Peso fresco acumulado de hojas por planta y de hojas podadas.

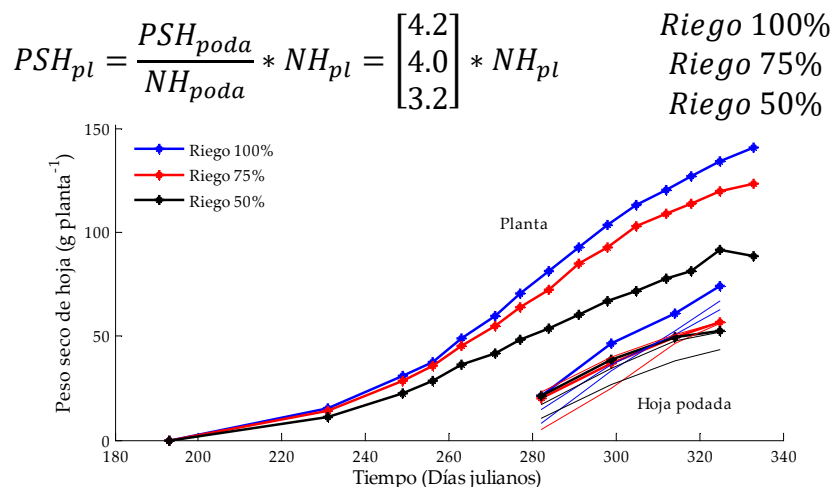


Figura 10. Peso seco de hojas por planta y de hojas podadas.

Juarez Maldonado *et al.* (2015) obtuvieron valores similares de peso fresco y peso seco de hoja por planta de tomate cultivado en sustrato turba-perlita 50:50 (v/v). Koch *et al.*,

(2019) encontraron la reducción en la biomasa de hoja en las plantas de tomate bajo estrés hídrico fue debido a la reducción en la biomasa de hoja individual, las áreas de producción de hoja y áreas de hojas específicas no fueron afectadas.

Peso fresco y seco de tallos

Los pesos frescos (Figura 11) y los pesos secos (Figura 12) de tallos incrementaron al aumentar el riego (100 > 75 > 50%) y la proporción turba-perlita (100:0 > 66:33 > 50:50 (v/v)). El agua tuvo un mayor efecto que el sustrato en los incrementos de peso fresco y peso seco de tallos. La biomasa de tallos incrementó de 113.7 a 143.5% (peso fresco) y de 41.6 a 61.9% (peso seco) al aumentar el riego, y de 38.2 a 57.5% (peso fresco) y de 1.4 a 12.5% (peso seco) al aumentar la proporción turba-perlita.

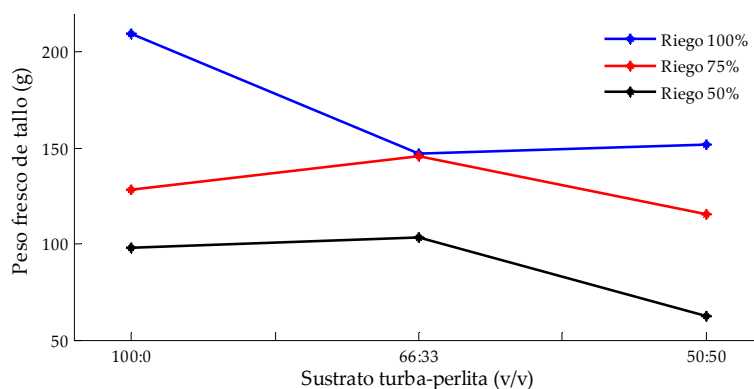


Figura 11. Peso fresco de tallo de la planta de tomate.

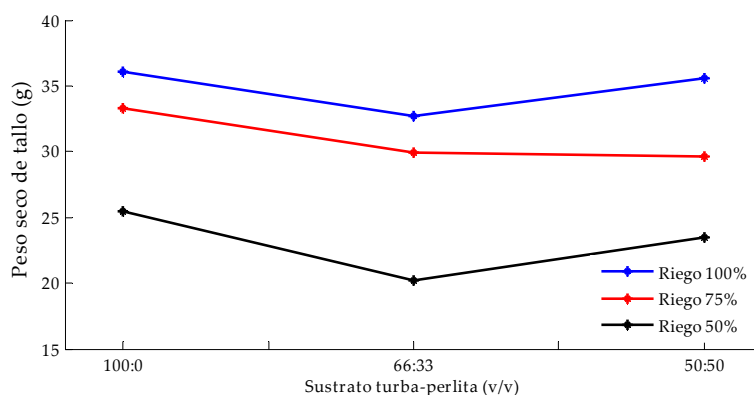


Figura 12. Peso seco de tallo de la planta de tomate.

Diámetro de tallos

En la Figura 13 se observa el diámetro, peso fresco y seco de tallo en el volumen de riego (100 > 75 > 50%) se incrementó en la proporción de turba-perlita 100:0 (v/v); en el volumen de riego (100 > 75 > 50%) incrementó el diámetro y peso seco de tallo en la proporción 66:33 (v/v), pero el peso fresco de tallo incrementó en el volumen de riego (100 = 75 > 50%) en la proporción 66:33 (v/v); y en el volumen de riego (100 > 75 > 50%) alcanzó el diámetro, peso fresco y seco de tallo en la proporción 50:50 (v/v).

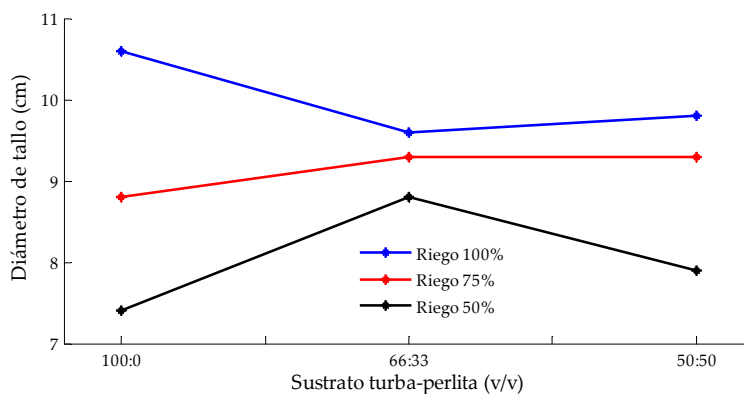


Figura 13. Diámetro de tallo de la planta de tomate.

Peso fresco y seco de raíces

Los pesos frescos (Figura 14) y los pesos secos (Figura 15) de raíces incrementaron al aumentar el riego (75 > 50%). La biomasa de raíces incrementó 20.3% (peso fresco) y 17.2% (peso seco) en la proporción baja de turba-perlita, y más del 100% (peso fresco) y 51.4% (peso seco) en la proporción alta de turba-perlita.

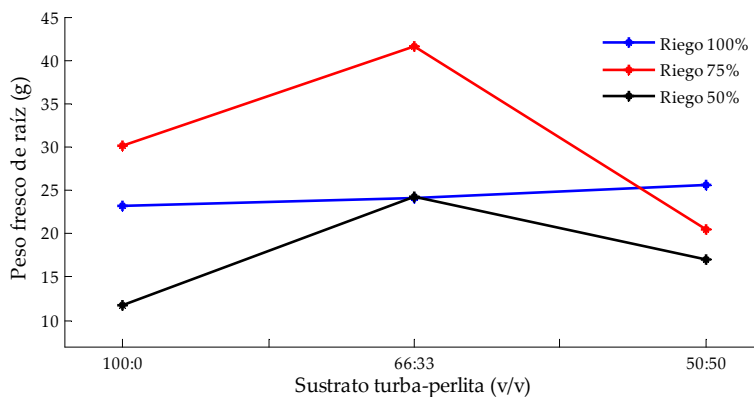


Figura 14. Peso fresco de raíz de tomate.

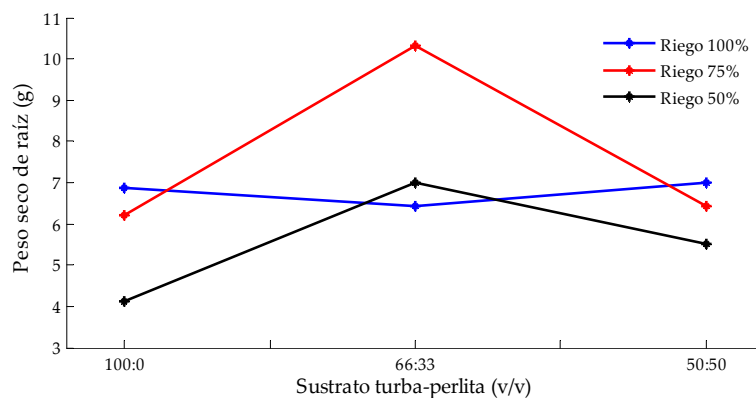


Figura 15. Peso seco de raíz de tomate.

Longitud de raíces

La longitud de raíces (Figura 16) presenta una relación directa al volumen de riego (100 > 50%) e inversa a la proporción turba-perlita (50:50 > 100:0 (v/v)). La longitud de raíces incrementó de 36.6 a 38.8% al aumentar el nivel de riego, y disminuyó de 25.1 a 26.2% al aumentar la proporción turba-perlita. La mayor densidad del sustrato turba-perlita 50:50 (v/v) favoreció el crecimiento de las raíces.

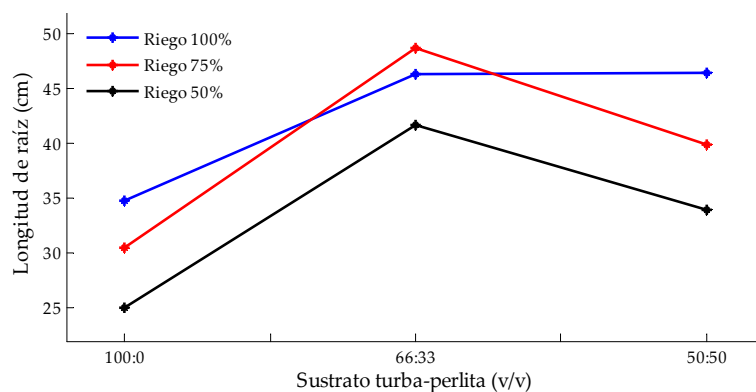


Figura 16. Longitud de raíz de tomate.

Variables de rendimiento del cultivo

Peso fresco y seco de frutos

Los pesos frescos (Figura 17) y los pesos secos (Figura 18) de frutos incrementaron al aumentar el riego (75 > 50%) y la proporción turba-perlita (100:0 > 50:50 (v/v)). La biomasa de frutos incrementó de 29.2 a 48.1% (peso fresco) y de 10.6 a 30.4% (peso seco) al aumentar el nivel de riego, y de 21.5 a 39.2% (peso fresco) y de 11.3 a 31.3%

(peso seco) al aumentar la proporción turba-perlita. Los sustratos perlita-turba 1:1 (v/v) tienen un rendimiento potencial de 106% (AlShrouf, 2017).

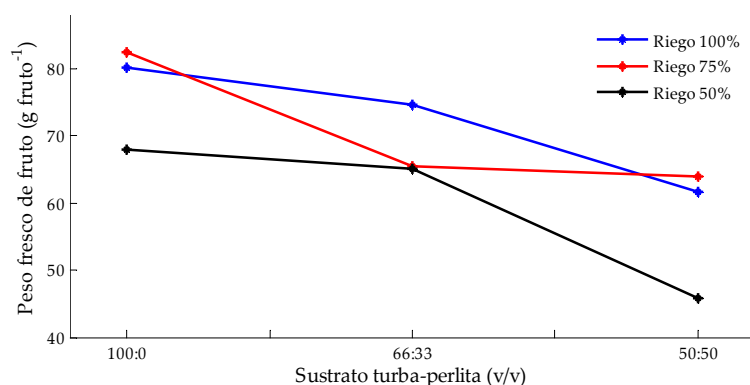


Figura 17. Peso fresco de fruto de tomate.

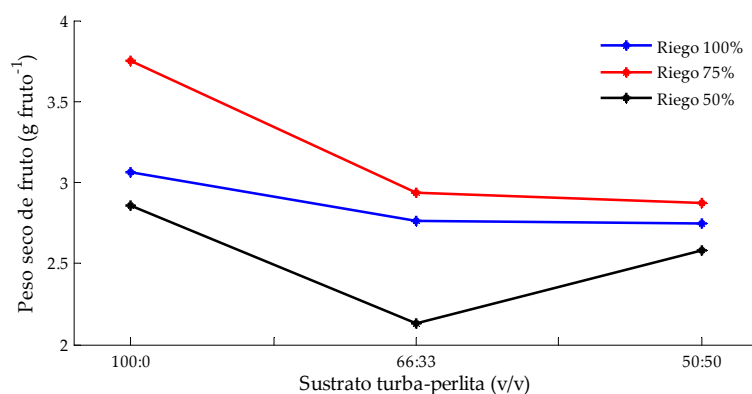


Figura 18. Peso seco de fruto de tomate.

Tamaño de frutos de tomate

Los valores promedio del diámetro polar y del diámetro ecuatorial de los frutos (Figura 19) incrementaron con el volumen de riego (100 > 75 > 50%) y la proporción de sustrato turba-perlita (100:0 > 66:33 > 50:50 (v/v)). El tamaño de frutos incrementó de 5.2 a 5.6% (diámetro polar) y de 8.1 a 8.2% (diámetro ecuatorial) al aumentar el nivel de riego, y de 7.0 a 7.4% (diámetro polar) y de 10.4 a 10.5% (diámetro ecuatorial) al aumentar la proporción turba-perlita.

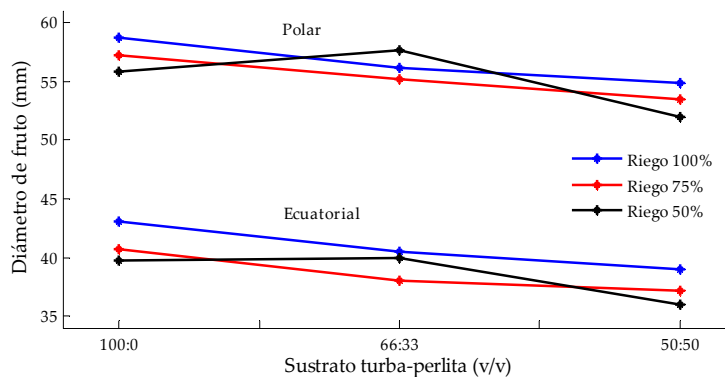


Figura 19. Tamaño de frutos de tomate.

Según la Norma Mexicana para Diámetro de Frutas (1982), el diámetro ecuatorial es utilizado para determinar el tamaño de los frutos, y la Norma Mexicana para Tomate (1998) clasificó los diámetros ecuatoriales para tomate saladette de 38-52 mm como fruto chico. Los resultados encontrados en este experimento fueron diámetros ecuatoriales de (36-44 mm), que es clasificado como fruto chico.

Sargent *et al.* (2002) indican que es utilizado el diámetro transversal (diámetro polar) como medida para el tamaño de los frutos en tomate, clasificando los tamaños en 48-54 mm como extra chico, 54-58 mm como chico, 58-64 mm como tamaño mediano; indicando que los frutos incrementaron con el volumen de riego (100 > 75 > 50%) y la proporción de sustrato turba-perlita (100:0), en la proporción (66:33 v/v) los frutos incrementaron el tamaño en el riego a (50 > 100 > 75%) sin diferencia significativa en comparación con el tratamiento de riego 100% y (100:0 v/v) a su vez, indicando mayor eficiencia en el uso del agua; en la proporción (50:50 v/v) los frutos fueron clasificados como chicos y el tamaño de los frutos incrementaron con el volumen de riego (100 > 75 > 50%).

Rendimiento de fruto fresco de tomate

En la Figura 20 se observa que el cultivo alcanzó mayor rendimiento al incrementar el volumen de riego (100 > 75 > 50%) y la proporción turba-perlita (100:0 > 66:33 > 50:50 v/v). El rendimiento incrementó de 69.4 a 71.8% al aumentar el nivel de riego, y de 47.1 a 49.2% al aumentar la proporción turba-perlita.

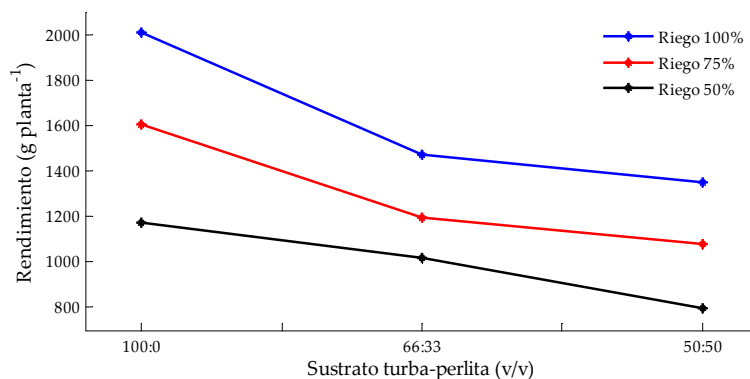


Figura 20. Rendimiento de tomate.

Para una producción con 10 racimos por planta y una densidad de población de 3.3 plantas m⁻², se puede obtener un rendimiento esperado (Re) de hasta 8 kg planta⁻¹ y 26.4 kg m⁻².

$$Re = \frac{10 \text{ racimos}}{2 \text{ racimos}} * \begin{bmatrix} 0.8 \text{ kg} \\ 1.6 \text{ kg} \end{bmatrix} = 4 \text{ a } 8 \text{ kg planta}^{-1} = 13.2 \text{ a } 26.4 \text{ kg m}^{-2}$$

Holanda es el líder mundial en intensificación de producción de tomate fresco en invernadero, con rendimiento anual mayor a 55 kg m⁻² (Heuvelink, 2005).

Al igual que Pires *et al.* (2011), el volumen de riego tuvo mayor influencia que la proporción turba-perlita en el rendimiento. Se obtuvieron frutos de hasta el 3er racimo en plantas con riego 100% en las mezclas turba-perlita 100:0 y 50:50 (v/v), y con riego 75% en la mezcla turba-perlita 66:33 (v/v), y frutos de hasta el 2do racimo en los demás tratamientos, debido principalmente al descenso de la temperatura al inicio de la formación y cuajado del fruto.

Ganeva *et al.* (2019) reportaron que el estrés hídrico redujo el número de flores en tomate en 25% y el número de frutos en 58%, y la mayor reducción del peso de frutos de 76.1 y 78.3% en los racimos 4to y 5to, respectivamente. Masoud *et al.* (2020) reportaron que la reducción de 50% de riego, disminuyó el rendimiento, la altura de planta, circunferencia, los racimos y el número de frutos en tomate cultivado en invernadero.

Un estrés excesivo al principio de la vida de la planta obstaculizará su capacidad para continuar con el crecimiento vegetativo (crecimiento de raíces, tallos y hojas) y generativo (crecimiento de las flores y frutos), reduciendo el rendimiento futuro de la planta (de Villiers, 2017).

Clima del invernadero

Radiación solar

La Figura 21 indica la radiación solar de 2 días medida en el invernadero. La falta de detección de la radiación solar trae consigo efectos negativos en los cultivos de invernadero, como el exceso o la falta de riego, y el consumo innecesario de energía (Zhang *et al.*, 2019).

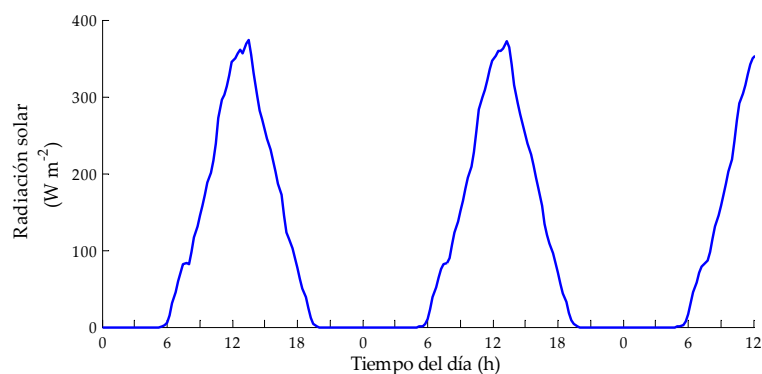


Figura 21. Radiación solar de dos días.

Radiación fotosintéticamente activa

La Figura 22 indica la radiación fotosintéticamente activa de 2 días medida en el invernadero.

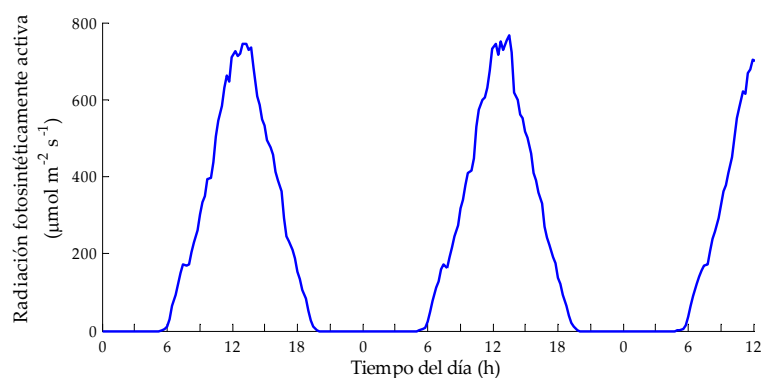


Figura 22. Radiación fotosintéticamente activa de dos días.

Las plantas usan la luz comprendida entre los 400-700 nm (conocida como radiación PAR, radiación fotosintéticamente activa, o luz de crecimiento), formada por longitudes de onda de la radiación solar que pueden ser absorbidos por la clorofila y otros órganos fotocromáticos de las plantas (García-Mendoza, 2017).

Salas-Rivera *et al.* (2020) reportaron valores máximos de la radiación fotosintéticamente activa de 102-142 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en primavera con un balance óptimo de K:Ca de 0.78-0.82, y de 479-475 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en verano en el balance K:Ca de 0.78. Ayala-Ttafoya *et al.* (2011) reportaron valores de radiación fotosintéticamente activa de 384.5 y 139.5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en cielo abierto y dentro del invernadero, respectivamente.

Temperatura del invernadero

La Figura 23 indica la temperatura de 2 días medida dentro del invernadero. La temperatura tiene un impacto directo sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos y puede alterar significativamente la fenología de las plantas (Pathak y Stoddard, 2018). En este experimento a pesar de las altas temperaturas alcanzadas (superiores a 30 °C), no se presentaron deficiencia de calcio en frutos en ningún tratamiento.

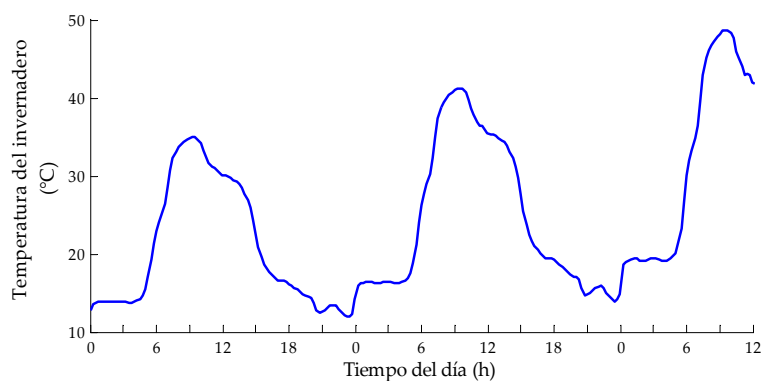


Figura 23. Temperatura del invernadero de dos días.

Humedad relativa

La Figura 24 indica la humedad relativa de 2 días medida dentro del invernadero. La humedad dentro de un invernadero depende de la transpiración del cultivo, es decir, la transpiración empuja el vapor hacia el aire, lo que a su vez reduce la transpiración (Katsoulas y Stanghellini, 2019).

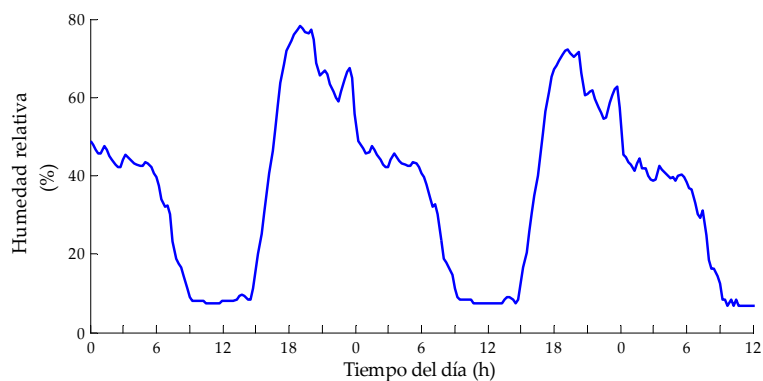


Figura 24. Humedad relativa de dos días.

Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (Figura 25) se calcula a partir de la presión de vapor saturado y la presión de vapor del aire, los cuales dependen de la temperatura del aire y de la humedad relativa:

$$DPV = PV_{sat} - PV_{aire} \quad \left\{ \begin{array}{l} PV_{sat} = 0.61078 * e^{17.27*T/(237.3+T)} \\ PV_{aire} = PV_{sat} * \frac{HR}{100} \end{array} \right.$$

donde DPV es el déficit de presión de vapor (kPa), PV_{sat} la presión de vapor saturado (kPa), PV_{aire} la presión de vapor del aire (kPa), T la temperatura del aire del invernadero ($^{\circ}C$), y HR la humedad relativa del invernadero (%).

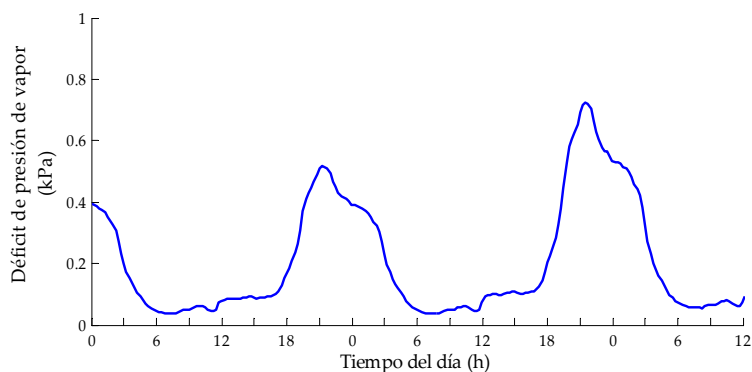


Figura 25. Déficit de presión de vapor de dos días.

En la Figura 26 se observa un déficit de presión entre 0.05 a 0.8 kPa. Valores altos del déficit de presión de vapor (2-6 kPa) con condiciones de alta irradiación y/o alta velocidad del flujo de aire, aumentan la transpiración de las hojas y, por lo tanto, la

pérdida de agua de los tejidos con consecuencias en toda la hidráulica de la planta (Amitrano *et al.*, 2017).

Cuando el déficit de presión de vapor es elevado, los estomas están completamente abiertos, por lo tanto, aumenta la demanda transpirativa, lo que contribuye al incremento de absorción de agua, elementos minerales disueltos y mayor actividad fotosintética que influye directamente en la cantidad de agua acumulado en los tejidos vegetales que se transfiere al aire del invernadero para regular de temperatura de la planta (Mendoza-Pérez *et al.*, 2020).

Valores bajos del déficit de presión de vapor aumentan la acumulación de biomasa en las hojas y reduce la acumulación de biomasa en los tallos, pero se acumula relativamente más K en los tallos y las raíces pero menos al follaje, además reduce la tasa de transpiración (Zhang *et al.*, 2020).

Transpiración del cultivo

En la Figura 26 se presentan los modelos de transpiración de tomate obtenidos por Jolliet y Bailey (1992) y Penman-FAO (1977), a partir de los cuales se calculó la tasa de transpiración (Tr [$\text{mg planta}^{-1} \text{s}^{-1}$]) de tomate del invernadero en función de la radiación solar (RS [W m^{-2}]) y el déficit de presión de vapor (DPV [kPa]), con la siguiente ecuación:

$$Tr = 0.18 * RS + 20.4 * DPV$$

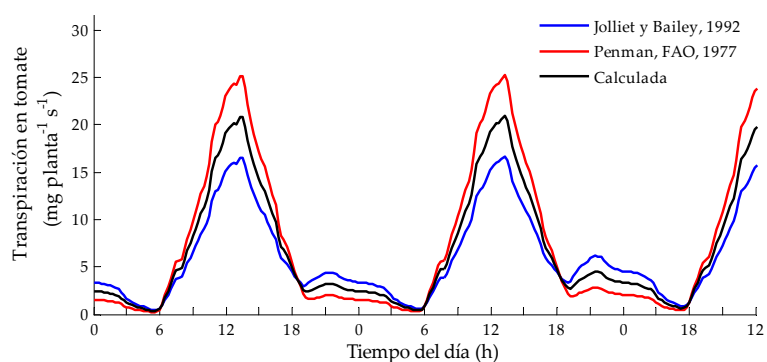


Figura 26. Transpiración de dos días calculada a partir de Jolliet y Bailey (1992) y Penman, FAO (1977).

Ishii *et al.* (2016) encontraron que la tasa de transpiración aumentó linealmente con un aumento en el déficit de presión de vapor del aire.

Dobrescu *et al.* (2016) concluyeron que el proceso de transpiración en el cultivo de tomate está positivamente correlacionado con la fotosíntesis que aumentó constantemente, pero a diferente ritmo durante las fenofases de desarrollo.

Jiang *et al.* (2019) evaluaron tres tratamientos de riego deficitario y en diferentes etapas de crecimiento en tomate (riego completo, 2/3 y 1/3) durante la floración y el desarrollo del fruto y maduración del fruto y el rendimiento, utilizaron seis modelos de rendimiento hídrico (Blank, Jensen, Singh, Stewart, Minhas y Rao). Los modelos de rendimiento hídrico pueden utilizarse para optimizar la gestión del agua de riego y proporcionar una base sólida para la producción eficiente de tomates (Jiang *et al.*, 2019).

Ayas (2019) evaluó el efecto de déficit hídrico en el rendimiento y calidad del tomate durante cuatro etapas de crecimiento del cultivo y encontró la cantidad de agua de riego aplicada a las plantas varió entre 0 y 554 mm en 2009, y entre 0 y 556 mm en 2010. El mismo autor encontró que el consumo de agua del tomate en 2009 osciló entre 300 y 725 mm y en 2010 osciló entre 340 y 746 mm, obtuvo rendimientos máximos de 92.2 y 93.4 ton ha⁻¹ y rendimientos mínimos de 2 y 4 ton ha⁻¹, la relación agua-rendimiento de 1.05 y 1.06, respectivamente.

Los modelos para la evapotranspiración de los cultivos de invernadero son necesarios, tanto para el riego preciso como para la simulación o gestión del clima del invernadero (Katsoulas y Stanghellini, 2019). Karaca *et al.* (2018) indicaron que es posible desarrollar una nueva ecuación o calibrar las ecuaciones existentes para cada invernadero diferente en la misma región, por lo tanto, sugieren que las ecuaciones de evapotranspiración que se utilizarán se seleccionen según el tipo de invernaderos comúnmente utilizados en la región y, si es necesario, se modifiquen de acuerdo con estas condiciones.

CONCLUSIONES

Las variables de crecimiento evaluadas y el rendimiento del tomate incrementaron al aumentar el volumen de riego y la proporción turba-perlita, sin embargo, el nivel de riego presentó mayor influencia sobre el rendimiento. La proporción turba-perlita 50:50 (v/v) favoreció el crecimiento de la raíz debido a que presentó una densidad mayor que la proporción turba-perlita 100:0 (v/v). El rendimiento, y la producción de fruto fresco por unidad de volumen de agua aplicado (productividad), pueden incrementarse al realizar el trasplante a inicios de mayo (122-126 dj) para garantizar las temperaturas apropiadas para el cultivo de tomate en invernadero.

El modelo senoidal utilizado permitió simular adecuadamente la aplicación de los riegos y la pérdida de humedad del sustrato, donde para cada valor del vector de tiempo le es asignado el volumen diario de riego (amplitud) y la hora del día en que se aplican los riegos, que en este caso fue un riego por día a las 18:00 h. Esta función senoidal fue utilizada en Matlab, y también puede ser utilizada en un modelo de dinámica de sistemas o diagramas de Forrester (Stella y Vensim).

LITERATURA CITADA

- Abdelkhalik A., Pascual-Seva N., Nájera I., Domene M.A., Baixauli C., Pascual B. 2019. Production response and irrigation water use efficiency of pepper (*Capsicum annuum* L.) to different deficit irrigation regimes. *Acta Horticulturae* (1253) 147–154.
- Aduhene-Chinbuah J. 2018. Physiology, growth, yield and fruit quality of selected greenhouse tomatoes (*solanum lycopersicum*) varieties as affected by different growing media and potting bag sizes. Thesis of Master. University of Ghana. pp.167.
- Alaoui S.M., Salghi R., Abouatallah A., Ayoub M. 2015. Impact of drip irrigation scheduling on fruit quality parameters and water use efficiency on Tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under unheated greenhouse. *Journal of Materials and Environmental Science* 6(2): 315-321.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. ISBN 92-5-304219-2. Italia, Roma. pp.277.
- Almanza-Merchán P.J., Arévalo Y.A., Cely-R, G.E., Pinzón E.H. and Serrano-C P.A. 2016. Fruit growth characterization of the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) hybrid ‘Ichiban’ grown under cover. *Agronomía Colombiana* 34(2): 155-162.
- AlShrouf A. 2017. Hydroponics, aeroponic and aquaponic as compared with conventional farming. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences* 27(1) 247-255.
- Amitrano C., Arena C., Roupheal Y., De Pascale S., De Micco V. 2019. Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments. *Annals Applied Biology*. 175: 313–325.
- Arnold, C.Y. 1959. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 74, 430-445.
- Ayala-Tafoya F., Zatarain-López D.M., Valenzuela-López M., Partida-Ruvalcaba L., Velázquez-Alcaraz T.J., Díaz-Valdés T., Osuna-Sánchez J.A. 2011. Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra Latinoamericana* 29(4): 403-410.
- Ayas S. 2019. Water-yield relationships of deficit irrigated tomato (*Lycopersicon lycopersicum* l. Var. Hazar F1). *Applied Ecology and Environmental Research* 17(4): 7765-7781.
- Barrett G.E., Alexander P.D., Robinson J.S., Bragg N.C. 2016. Achieving environmentally sustainable growing media for soilless plant cultivation systems – A review. *Scientia Horticulturae* 212, 220–234.

- Benton-Jones J. Jr. 2007. Tomato plant culture in field, greenhouse and home garden. 2da ed. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL. USA. pp. 399.
- Bibi B., Sajid M., Rab A., Shah S.T., Ali N., Jan I., Haq I., Wahid F., Bibi H., Imran A. 2012. Effect of partial shade on growth and yield of tomato cultivars. *Global Journal of Biology, Agriculture & Health Sciences* 1(1):22-26.
- Bisbis M.B., Gruda N.S., Blanke M.M. 2019. Securing horticulture in a changing climate-A mini review. *Horticulturae* 5, 56.
- Bunce J. 2016. Variation among soybean cultivars in mesophyll conductance and leaf water use efficiency. *Plants* 5, 44.
- Butrón-Mamani C. 2017. Calibración de la ecuación FAO Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) en condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Cota, Cota. Tesis de Maestría. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. pp.80.
- Cahn M., Johnson L. 2017. New approaches to irrigation scheduling of vegetables. *Horticulturae* 3(2), 28.
- Cervantes-Gómez L. 2015. Modelización matemática. Principios y aplicaciones. 1^{ra}. Ed. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. pp.209.
- de Villiers M. 2017. Predicting tomato crop yield from weather data using statistical learning techniques. Thesis of Master. Stellenbosch University. Matieland, South Africa. pp.233.
- Dirirsa G., Hordofa T., Bekele D. 2017. Crop coefficient and water requirement of Tomato (*Melka Shola* variety) at Melkassa, Central Rift Valley of Ethiopia. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research* 5(5): 336-340.
- Dobrescu A., Hoza G., Bălan D. 2016. Dynamics of physiological processes in tomatoes during the phenological stages. *Scientific Papers, Horticulture* 60, 151-154.
- Dubský M., Šrámek F. 2009. The effect of rockwool on physical properties of growing substrates for perennials. *Horticultural Science (Prague)* 36(1): 38–43.
- Dyśko J., Szczech M., Kaniszewski S., Kowalczyk W. 2020. Parameters of drainage waters collected during soilless tomato cultivation in mineral and organic substrates. *Agronomy* 10(12), 2009.
- FAO. 2017. Water for sustainable food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Rome, Italy*. 27p.
- FAOSTAT. 2020. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- Ferrando I., Albarracín L., Gallart C., García-Raffi L.M., Gorgorió N. 2017. Análisis de los modelos matemáticos producidos durante la resolución de problemas de Fermi. *Bolema: Boletim de Educação Matemática*. 31(57): 220–242.

- Ferrante A., Mariani L. 2018. Agronomic management for enhancing plant tolerance to abiotic stresses: high and low values of temperature, light intensity, and relative humidity. *Horticulturae* 4(3), 21.
- 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.
- Gallardo M., Gimenez C., Fernández M.D., Padilla F.M., Thompson R.B. 2018. Use of the VegSyst model to calculate crop N uptake and ET_c of different vegetable species grown in Mediterranean greenhouses. Proc. V Int. Symp. on Ecologically Sound Fertilization Strategies for Field Vegetable Production. *Acta Horticulturae*. 1192, 105-112.
- Ganeva D., Grozeva S., Pevcharova G. 2019. Effect of reduced irrigation on flowering, fruit set and yield of indeterminate Tomato. *International Journal of Recent Technology and Engineering* 8:932-936.
- García-Mendoza S.G. 2017. Efecto de las mallas sombra de diferentes colores y una cubierta plastica sobre el rendimiento y calidad del cultivo de tomate. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México. pp. 75.
- García-Solís E.A. 2016. Relación de evapotranspiración de cultivo con la de referencia en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) bajo condiciones de invernadero. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila, México. pp. 105.
- Gil R., Bojacá C.R., Schrevens E. 2017. A tailor-made crop growth model for the tomato production systems in Colombia. *Agronomía Colombiana* 35(3): 301-313.
- Giuliani M.M., Carucci F., Nardella E., Francavilla M., Ricciardi L., Lotti C., Gatta, G. 2018. Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 233,149–158.
- Gohardoust M.R., Bar-Tal A., Effati M., Tuller M. 2020. Characterization of physicochemical and hydraulic properties of organic and mineral soilless culture substrates and mixtures. *Agronomy* 10, 1403.
- Goudriaan J., van Laar H.H. 1994. Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, the Netherlands. Pp. 238.
- Gruda N. 2019. Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*. 9, 298.
- Harel D., Fadida H., Slepoy A., Gantz S., Shilo, K. 2014. The effect of mean daily temperature and relative humidity on pollen, fruit set and yield of Tomato grown in commercial protected cultivation. *Agronomy* 4(1), 167–177.
- Heuvelink E. 2005. Tomatoes. CAB International. 339 p.

- Hou M., Tian F., Zhang L., Li S., Du T., Huang M., Yuan Y. 2019. Estimating crop transpiration of soybean under different irrigation treatments using thermal infrared remote sensing imagery. *Agronomy* 9(1), 8.
- Hua J., Wang X., Wang H., Fan X., Kang M. 2017. Prediction of crop phenology – a component of parallel agriculture management. Chinese Automation Congress (CAC). DOI:10.1109/CAC.2017.8244172.
- Huang X., Liu J., Zhu W., Atzberger C., Liu Q. 2019. The optimal threshold and vegetation index time series for retrieving crop phenology based on a modified dynamic threshold method. *Remote Sensing* 11(23), 2725.
- Ishii M., Sase S., Moriyama H., Okushima L., Ikeguchi A., Hayashi M., Kurata K., Kubota C., Kacira M., Giacomelli G.A. 2016. Controlled environment agriculture for effective plant production systems in a semiarid greenhouse. *Japan Agricultural Research Quarterly* 50 (2), 101 – 113.
- Jaafar H.H., Ahmad F. 2019. Determining reference evapotranspiration in greenhouses from external climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 145(9): 04019018.
- Jaimes-Gualdrón A.F. 2016. Modelo de simulación con dinámica de Sistema para el Sistema productiva de la fábrica Calzado Brioso y Blessing. Tesis de Licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. 124p.
- Jensen M.E., Allen R.G. 2016. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. ASCE manuals and reports on engineering practice No. 70. Second Edition. American Society of Civil Engineers. ISBN 978-0-7844-7920-9 (PDF). Reston, Virginia, USA. 744p.
- Jiang X., Zhao Y., Wang R., Zhao S. 2019. Modeling the relationship of Tomato yield parameters with deficit irrigation at different growth stages. *HortScience* 54(9):1492–1500.
- Jones, J.W.; Dayan, E.; Allen, L.H.; VanKeulen, H.; Challa, H. A. 1998. dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 34, 663–672.
- Kamatchi S.B., Parvathi R. 2020. Crop-climate management: A review. *Journal of Critical Reviews*. 7(6): 871-880.
- Karaka C., Tezcan A., Büyüktaş D., Baştuğ, R. 2018. Equations developed to estimate evapotranspiration in greenhouses. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences* 28(4): 482-489.
- Katsoulas N., Stanghellini C. 2019. Modelling crop transpiration in greenhouses: Different models for different applications. *Agronomy* 9, 392.
- Kaur S., Singh, M. 2020. Modeling the crop growth - A review. *MAUSAM* 71(1): 103-114.

- Kawasaki Y., Yoneda Y. 2019. Local temperature control in greenhouse vegetable production. *The Horticulture Journal* 88 (3): 305–314.
- Koch G., Rolland G., Dauzat M., Bédiée A., Baldazzi V., Bertin N., Guédon Y., Granier C. 2019. Leaf production and expansion: A generalized response to drought stresses from cells to whole leaf biomass—A case study in the tomato compound leaf. *Plants* 8(10), 409.
- Kuijpers J.P W., van de Molengraft J.G M., van Mourik S., van 't Ooster A., Hemming S., van Henten E.J. 2019. Model selection with a common structure: Tomato crop growth models. *Biosystems Engineering* 187, 247–257.
- Kumar-Sharma P., Dheeraj K., Hari Shanker-Srivastava H., Patel P. 2018. Assessment of different methods for soil moisture estimation: A review. *Journal of Remote Sensing & GIS* 9(1): 57–73.
- Lang, D., Zheng J., Shi J., Liao F., Ma X., Wang W., Chen X., Zhang M. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman–Monteith method in Southwestern China. *Water* 9(10), 734.
- Lin D., Wei R., Xu L. 2019. An integrated yield prediction model for greenhouse tomato. *Agronomy*. 9, 873.
- Londra P., Paraskevopoulou A., Psychogiou M. 2018. Hydrological behavior of peat- and coir-based substrates and their effect on begonia growth. *Water* 10(6), 722.
- Madhavi L, D. y Salunkhe K, D. 2004. Tratado de ciencia y tecnología de las hortalizas. Producción, composición, almacenamiento y procesado. El tomate. 7. Ed. Acirbia. Zaragoza, España. 739p.
- Mancilla-Morales J. A., Tornero-Campante M. A., López-Crúz I. L. 2019. Evaluation of a mathematical model to predict growth and nitrogen content in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 11(2), 111–125.
- Manikandan K., Vethamoni I. 2017. A review: Crop modeling in vegetable crops. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 6(4): 1006-1009.
- Markoska V., Spalevic V., Lisichkov K., Atkovska K., Gulaboski R. 2018. Determination of water retention characteristics of perlite and peat. *Agriculture and Forestry* 64 (3): 113-126.
- Martínez-Ruíz A., López-Crúz I.L., Ruíz-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.
- Masoud J.-Al-marri., Osman A.E.A., Mohammed I.A., Mohamed M., Hichem R. 2020. Growth, yield, and quality of greenhouse tomato in response to different irrigation levels using buried diffuser (bd) and surface drip (sd) irrigation methods under arid conditions. *International Journal of Biology and Biotechnology* 17 (1): 87-96.

- McAdam S.A.M., Brodribb T.J. 2016. Linking turgor with ABA biosynthesis: implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology* 171:2008–2016.
- Mendoza-Pérez C., Ramírez-Ayala C., Ascencio-Hernández R., Ruelas-Islas J.R., Núñez-Ramírez F. 2020. Influencia de variables climáticas en el desarrollo vegetativo, rendimiento y calidad del tomate en función de número de tallos. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*. 45:31-46.
- Mendoza-Pérez C., Ramírez-Ayala C., Ojeda-Bustamente W., Trejo C., López-Ordáz A., Quevedo-Nolasco A., Martínez-Ruiz A. 2018. Response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to water consumption, leaf area and yield with respect to the number of stems in the greenhouse. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO* 50(2): 87-104.
- Mo X.-G., Hu S., Lin Z.-H., Liu S.-X., Xia, J. 2017. Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. *Advances of Climate Change Research*. 93-98 p.
- Neupane J., Guo W. 2019. Agronomic basis and strategies for precision water management: A review. *Agronomy* 9(2), 87.
- Nikolaou G., Neocleous D., Katsoulas N., Kittas C. 2019. Irrigation of greenhouse crops. *Horticulturae* 5(1), 7.
- Nisen A., Grafiadellis M., Jiménez R., La Malfa G., Martínez-García P.F., Monteiro A., Verlodt H., Villele O., Zabeltitz C.H., Denis J.C., Baudoin W., Garnaud J.C. 1988. Cultures protegées en climat méditerranéen. Études FAO production végétale et protection des plantes 90. FAO, Rome. pp.317.
- Norma Mexicana para Diámetro de Frutas. "NMX-FF-009-1982. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - Fruta fresca - Determinación del tamaño en base al diámetro ecuatorial.". México: Consultado mayo 2021. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx>, 1982.
- Norma Mexicana para Tomate. "NMX-FF-031-1997-SCFI. 1998. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano- Hortalizas frescas- Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill)- Especificaciones". México. Consultado mayo 2021. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/index.nmx>.
- OECD. 2017. Safety assessment of transgenic organisms in the environment “Tomato (*Solanum lycopersicum*)”. Volume 7: OECD consensus documents, harmonisation of regulatory oversight in biotechnology, OECD publishing, Paris. pp.241.
- Ojeda-Bustamente W., Sifuentes-Ibarra E., Slack D.C. and Carrillo, M. 2006. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept application to a potato crop. *Irrigation and Drainage* 53: 251-261.
- Olberz M., Kahlen K., Zinkernagel J. 2018. Assessing the impact of reference evapotranspiration models on decision support systems for irrigation. *Horticulturae* 4(4), 49.

- Paparrizos S., Matzarakis A. 2017. Present and future responses of growing degree days for Crete Island in Greece. *Advances in Science Research* 14, 1–5.
- Pathak T.B., Stoddard C.S. 2018. Climate change effects on the processing tomato growing season in California using growing degree day model. *Modeling Earth Systems and Environment* 4:765–775.
- Perin L., Peil R. M. N., Trentin R., Streck E. A., da Rosa D. S. B., Hohn D., Schaun, W. S. 2018. Solar radiation threshold and growth of mini tomato plants in mild autumn/winter condition. *Scientia Horticulturae* 239, 156–162.
- Pires R.C.M., Furlani P.R., Vasconcelos-Ribeiro R., Bodine-Junior D., Sakai E., Lourenção A.L., Torre-Neto A. 2011. Irrigation frequency and substrate volume effects in the growth and yield of tomato plants under greenhouse conditions. *Scientia Agricola* 68(4):400-405.
- Posada L. 2016. *Solanum lycopersicum*. Monografía. Colegio Bolivar. Agricultural Science. Cali, Colombia. pp.33.
- Priestley C.H.B., Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100:81-92.
- Putranta H., Permatasari A.K., Sukma T.A., Suparno T.A., Dwandaru W.S.B. 2019. The effect of pH, electrical conductivity, and nitrogen (N) in the soil at Yogyakarta special region on tomato plant growth. *TEM Journal*. 8(3):860-865.
- Ramírez-Jiménez J.A., Hoyos-Carbajal L.M., Córdoba-Gaona O.J. 2020. Phenology growth and yield of grafted tomato plants in the high Andean region of Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 15(1):1-9.
- Rodríguez-González O., Florido-Bacallao R., Varela-Nualles M. 2018. Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba. *Cultivos Tropicales* 39(1):121-126.
- Ruggieri V., Calafiore R., Schettini C., Rigano M., Olivieri F., Frusciante L., Barone A. 2019. Exploiting genetic and genomic resources to enhance heat-tolerance in tomatoes. *Agronomy* 9(1), 22.
- Ruggiero A., Punzo P., Landi S., Costa A., Van Oosten M., Grillo S. 2017. Improving plant water use efficiency through molecular genetics. *Horticulturae* 3(2), 31.
- Saito T., Kawasaki Y., Ahn A.-H., Ohyawa A., Higashide T. 2020. Prediction and improvement of yield and dry matter production based on modeling and non-destructive measurement in year-round greenhouse tomatoes. *The Horticulture Journal* 89(4): 425-431.
- Salas-Rivera R., Valdez-Aguilar L.A., Alvarado-Camarillo D., Rascón-Alvarado E., Peña-Ramos F.M., González-Fuentes J.A. 2020. Balance potasio: calcio, relación con el déficit de presión de vapor y la radiación fotosintéticamente activa en tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana* 38(2): 301-311.

- Salcedo G.A., Reza J., Pérez-Saiz M., Lao M.T. 2017. Irrigation water consumption modelling of a soilless cucumber crop under specific greenhouse conditions in a humid tropical climate. *Ciência Rural, Santa Maria* 47(2): 1-9.
- Samar M., Saxena S. 2016. Study of chemical and physical properties of perlite and its application in India. *International Journal of Science Technology and Management* 5(4): 70-80.
- San Martín-Hernández C., Trejo-Téllez L.I., Gómez-Merino F.C., Volke-Haller V.H., Escalante-Estrada J.A., Sánchez-García P., Saucedo-Veloz C. 2016. Nitrogen and potassium nutrition differentially affect tomato biomass and growth. *Interciencia* 41(1): 60-66.
- Santos F. L 2018. Assessing Olive evapotranspiration partitioning from soil water balance and radiometric soil and canopy temperatures. *Agronomy*. 8, 43.
- Saqib M., Anjum M.A. 2021. Applications of decision support system: A case study of solanaceous vegetables. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 90(2): 331-352.
- Sargent S., Celso L., Moretti C. 2002. The Commercial Storage of Fruits, Vegetables and Florist and Nursery Crops. Tomato. USDA, Agricultural Research Service.
- Schindler U., Müller L. 2017. Hydraulic performance of horticultural substrates—2. Development of an evaluation framework. *Horticulturae* 3(1), 6.
- Segura-Castruita M.A., Ortíz-Solorio C.A. 2017. Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua* 8(3): 93-110.
- 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. *International Agrophysics* 32(2), 287–302.
- Sinclair T. R., Ghanem M. E. 2020. Plant-based predictions of canopy transpiration instead of meteorological approximations. *Crop Science* 1-9 doi:10.1002/csc2.20067
- Snyder R. 2017. Climate change impacts on water use in horticulture. *Horticulturae* 3(2), 27.
- Somnuek S., Hong Y., Kim M., Lee S., Baek J., Kwak K., Lee H., Lee J. 2020. Assessment of water control model for Tomato and Paprika in the greenhouse using the Penman-Monteith model. *Protected Horticulture and Plant Factory* 29 (3): 209-218.
- Steiner A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15, 134-154.

- Szota C., Fletcher T., Desbois C., Rayner J., Williams N., Farrell C. 2017. Laboratory tests of substrate physical properties may not represent the retention capacity of green roof substrates in situ. *Water* 9(12), 920.
- Tahashildar M., Bora K.P., Ray P.I. L., Ram V. 2017. Crop-coefficient of tomato as derived using monolithic weighting type lysimeter in midhill region of Meghalaya. *MAUSAM* 68(4) 723-732.
- Tripathi P., Kumar A. 2015. Climate change effect on crop productivity. Crop modelling for agriculture production and management. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. pp.101-122.
- Udias A., Pastori M., Malago A., Vigiak O., Nikolaidis N.P., Bouraoui F. 2018. Identifying efficient agricultural irrigation strategies in Crete. *Science of The Total Environment* 633, 271–284.
- Villanueva-Gutierrez EE 2018. An overview of recent studies of tomato (*Solanum lycopersicum* spp) from a social, biochemical and genetic perspective on quality parameters. Alnarp-Sweden: Sveriges lantbruksuniversitet. (Introductory Paper, 2018:3). 57p.
- Wang Y.-J., Qin D.-H. 2017. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview. *Advances in Climate Change Research*. doi:10.1016/j.accre.2017.08.004.
- Xiukang W., Yingying X. 2016. Evaluation of the effect of irrigation and fertilization by drip fertigation on tomato yield and water use efficiency in greenhouse. *International Journal of Agronomy* 1, 1–10.
- Yan W., Zhang Y., Zhang, Y., Cheng, R., Zhang, Y., Yang, Q. and Li, T. 2018. Effects of supplementary artificial light on growth of the tomato (*Solanum lycopersicum*) in a Chinese solar greenhouse. *The Horticulture Journal* 87 (4): 516-523.
- Yu Q., Shah K., Wang D., Ma Y., Wang Z. 2019. Model based study of crop evapotranspiration under canopy shading. *Agronomy* 9(6), 334.
- Zhang D., Zhang T., Ji J., Sun Z., Wang Y., Sun Y., Li Q. 2020. Estimation of solar radiation for Tomato water requirement calculation in Chinese-Style solar greenhouses based on least mean squares filter. *Sensors* 20, 155.
- Zhang D., Zhang Z., Li J., Chang Y., Du Q., Pan T. 2015. Regulation of vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. *PLoS ONE* 10:e0133919.
- Zhang H., Huang G., Xu X., Xiong Y., Huang Q. 2018. Estimating evapotranspiration of processing tomato under plastic mulch using the SIMDualKc model. *Water* 10(8), 1088.
- Zhang J., Jiao X., Du Q., Song X., Ding J., Li J. 2020. Effects of vapor pressure deficit and potassium supply on root morphology, potassium uptake, and biomass allocation of Tomato seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation* 40, 509–518.

ANEXO. Análisis de varianza

Altura de planta - 05 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.01	0.00	17.50

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8.61	2	4.31	0.13	0.8772
Tratamiento	8.61	2	4.31	0.13	0.8772
Error	883.07	27	32.71		
Total	891.68	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 5.24773

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	32.26	10	2.04	a
R75	32.33	10	1.37	a
R50	33.43	10	1.94	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 12 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	1.2E-03	0.00	13.53

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	1.57	2	0.78	0.02	0.9843
Error	1336.50	27	49.50		
Total	1338.07	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 6.45594

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	52.17	10	2.65	a
R75	52.16	10	1.87	a
R50	51.68	10	2.09	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 19 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.04	0.00	10.28

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	60.56	2	30.28	0.55	0.5828
Tratamiento	60.56	2	30.28	0.55	0.5828
Error	1484.09	27	54.97		
Total	1544.65	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 6.80306

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	73.29	10	2.75	a
R75	72.90	10	1.61	a
R50	70.10	10	2.52	a

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 27 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.18	0.12	6.99

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	250.20	2	125.10	2.99	0.0673
Tratamiento	250.20	2	125.10	2.99	0.0673
Error	1131.00	27	41.89		
Total	1381.20	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 5.93890

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	95.60	10	2.63	a
R75	93.50	10	1.50	ab
R50	88.70	10	1.84	b

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 03 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.44	0.40	6.52

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1008.07	2	504.03	10.74	0.0004
Tratamiento	1008.07	2	504.03	10.74	0.0004
Error	1266.90	27	46.92		
Total	2274.97	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS =

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	111.60	10	2.75	a
R75	106.00	10	1.28	a
R50	97.50	10	2.20	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 10 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.57	0.54	6.29

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1980.87	2	990.43	17.76	<0.0001
Tratamiento	1980.87	2	990.43	17.76	<0.0001
Error	1505.80	27	55.77		
Total	3486.67	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 6.85264

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	128.50	10	3.24	a
R75	118.90	10	1.69	b
R50	108.60	10	1.83	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 17 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.88	0.87	4.06

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6187.27	2	3093.63	98.86	<0.0001
Tratamiento	6187.27	2	3093.63	98.86	<0.0001
Error	844.90	27	31.29		
Total	7032.17	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 5.13307

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	153.10	10	2.14	a
R75	141.80	10	1.55	b
R50	118.60	10	1.56	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 24 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.80	0.78	5.39

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7408.80	2	3704.40	53.89	<0.0001
Tratamiento	7408.80	2	3704.40	53.89	<0.0001
Error	1856.00	27	68.74		
Total	9264.80	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 7.60788

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	170.60	10	1.52	a
R75	158.00	10	2.80	b
R50	132.80	10	3.23	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 31 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.72	0.70	6.78

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9288.07	2	4644.03	35.48	<0.0001
Tratamiento	9288.07	2	4644.03	35.48	<0.0001
Error	3534.10	27	130.89		
Total	12822.17	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 10.49818

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	187.80	10	1.79	a
R75	173.30	10	4.84	b
R50	145.40	10	3.55	c

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 07 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.68	0.65	7.19

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9254.47	2	4627.23	28.38	<0.0001
Tratamiento	9254.47	2	4627.23	28.38	<0.0001
Error	4402.90	27	163.07		
Total	13657.37	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 11.71774

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	195.20	10	2.13	a
R75	183.90	10	5.16	a
R50	153.60	10	4.22	b

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 13 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.63	0.61	7.71

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9480.47	2	4740.23	23.23	<0.0001
Tratamiento	9480.47	2	4740.23	23.23	<0.0001
Error	5510.20	27	204.08		
Total	14990.67	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 13.10866

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	203.50	10	2.66	a
R75	191.30	10	5.92	a
R50	161.20	10	4.37	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 20 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.56	0.53	8.85

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10263.20	2	5131.60	17.46	<0.0001
Tratamiento	10263.20	2	5131.60	17.46	<0.0001
Error	7937.60	27	293.99		
Total	18200.80	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 15.73328

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	213.80	10	4.08	a
R75	198.40	10	7.19	a
R50	169.20	10	4.46	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Altura de planta - 28 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.55	0.52	9.88

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13048.47	2	6524.23	16.76	<0.0001
Tratamiento	13048.47	2	6524.23	16.76	<0.0001
Error	10511.40	27	389.31		
Total	23559.87	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 18.10526

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	222.10	10	4.91	a
R75	205.20	10	8.27	a
R50	171.90	10	4.93	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 05 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.03	0.00	11.12

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.47	2	0.23	0.37	0.6938
Tratamiento	0.47	2	0.23	0.37	0.6938
Error	17.00	27	0.63		
Total	17.47	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.72811

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	7.30	10	0.26	a
R75	7.10	10	0.23	a
R50	7.00	10	0.26	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 12 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.00	0.00	9.56

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.00	2	0.00	0.00	>0.9999
Tratamiento	0.00	2	0.00	0.00	>0.9999
Error	20.00	27	0.74		
Total	20.00	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.78975

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	9.00	10	0.26	a
R75	9.00	10	0.26	a
R50	9.00	10	0.30	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 19 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.03	0.00	6.88

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.60	2	0.30	0.48	0.6244
Tratamiento	0.60	2	0.30	0.48	0.6244
Error	16.90	27	0.63		
Total	17.50	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.72597

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	11.70	10	0.30	a
R75	11.40	10	0.22	a
R50	11.40	10	0.22	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 27 de septiembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.24	0.19	6.78

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7.47	2	3.73	4.34	0.0231
Tratamiento	7.47	2	3.73	4.34	0.0231
Error	23.20	27	0.86		
Total	30.67	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.85059

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	14.20	10	0.20	a
R75	13.80	10	0.25	ab
R50	13.00	10	0.39	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 03 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.32	0.27	6.66

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14.47	2	7.23	6.40	0.0053
Tratamiento	14.47	2	7.23	6.40	0.0053
Error	30.50	27	1.13		
Total	44.97	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.97527

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	16.80	10	0.25	a
R75	16.00	10	0.26	ab
R50	15.10	10	0.46	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 10 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.46	0.43	6.63

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	33.80	2	16.90	11.73	0.0002
Tratamiento	33.80	2	16.90	11.73	0.0002
Error	38.90	27	1.44		
Total	72.70	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.10141

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	19.40	10	0.27	a
R75	18.10	10	0.28	b
R50	16.80	10	0.53	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 17 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.63	0.60	5.46

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	59.27	2	29.63	23.12	<0.0001
Tratamiento	59.27	2	29.63	23.12	<0.0001
Error	34.60	27	1.28		
Total	93.87	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.03875

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	22.10	10	0.41	a
R75	21.30	10	0.26	a
R50	18.80	10	0.39	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 24 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.60	0.57	5.85

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	73.27	2	36.63	20.35	<0.0001
Tratamiento	73.27	2	36.63	20.35	<0.0001
Error	48.60	27	1.80		
Total	121.87	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.23110

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	24.70	10	0.37	a
R75	23.20	10	0.39	b
R50	20.90	10	0.50	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 31 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.71	0.69	4.95

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	103.47	2	51.73	33.66	<0.0001
Tratamiento	103.47	2	51.73	33.66	<0.0001
Error	41.50	27	1.54		
Total	144.97	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.13762

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	26.90	10	0.35	a
R75	25.70	10	0.40	b
R50	22.50	10	0.43	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 07 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.68	0.65	4.98

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	100.07	2	50.03	28.26	<0.0001
Tratamiento	100.07	2	50.03	28.26	<0.0001
Error	47.80	27	1.77		
Total	147.87	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.22092

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	28.70	10	0.33	a
R75	27.20	10	0.36	b
R50	24.30	10	0.54	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 13 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.64	0.62	5.53

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	117.60	2	58.80	24.39	<0.0001
Tratamiento	117.60	2	58.80	24.39	<0.0001
Error	65.10	27	2.41		
Total	182.70	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.42484

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	30.30	10	0.45	a
R75	28.50	10	0.40	b
R50	25.50	10	0.60	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 20 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.59	0.56	6.23

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	132.07	2	66.03	19.51	<0.0001
Tratamiento	132.07	2	66.03	19.51	<0.0001
Error	91.40	27	3.39		
Total	223.47	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.68829

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	31.90	10	0.67	a
R75	29.90	10	0.46	b
R50	26.80	10	0.59	c

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas – 28 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.53	0.49	8.00

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	180.27	2	90.13	14.99	<0.0001
Tratamiento	180.27	2	90.13	14.99	<0.0001
Error	162.40	27	6.01		
Total	342.67	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 2.25044

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	33.60	10	0.81	a
R75	30.80	10	0.74	b
R50	27.60	10	0.78	c

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas, poda 1 – 08 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.15	0.09	11.72

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.87	2	2.43	2.47	0.1035
Tratamiento	4.87	2	2.43	2.47	0.1035
Error	26.60	27	0.99		
Total	31.47	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.91078

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	8.70	10	0.30	a
R75	8.80	10	0.25	a
R50	7.90	10	0.38	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas, poda 2 – 25 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.09	0.02	7.97

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.27	2	0.13	1.33	0.2804
Tratamiento	0.27	2	0.13	1.33	0.2804
Error	2.70	27	0.10		
Total	2.97	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.29017

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	4.10	10	0.10	a
R75	3.90	10	0.10	a
R50	3.90	10	0.10	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas, poda 3 – 09 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.10	0.03	17.21

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.80	2	0.40	1.50	0.2411
Tratamiento	0.80	2	0.40	1.50	0.2411
Error	7.20	27	0.27		
Total	8.00	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 0.47385

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	3.20	10	0.20	a
R75	2.80	10	0.15	a
R50	3.00	10	0.13	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Número de hojas, poda 4 – 20 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.27	0.22	27.71

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16.47	2	8.23	5.00	0.0143
Tratamiento	16.47	2	8.23	5.00	0.0143
Error	44.50	27	1.65		
Total	60.97	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.17803

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	5.30	10	0.33	a
R75	5.00	10	0.26	a
R50	3.60	10	0.56	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de hoja, poda 1 – 08 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.12	0.06	22.69

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2844.87	2	1422.43	1.91	0.1672
Tratamiento	2844.87	2	1422.43	1.91	0.1672
Error	20079.30	27	743.68		
Total	22924.17	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 25.02355

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	129.00	10	9.56	a
R75	124.90	10	8.94	a
R50	106.60	10	7.20	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de hoja, poda 2 – 25 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.69	0.66	10.66

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14885.07	2	7442.53	29.39	<0.0001
Tratamiento	14885.07	2	7442.53	29.39	<0.0001
Error	6836.80	27	253.21		
Total	21721.87	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 14.60162

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	179.20	10	5.25	a
R75	142.80	10	1.97	b
R50	125.80	10	6.67	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de hoja, poda 3 – 09 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.71	0.69	17.51

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10623.80	2	5311.90	33.61	<0.0001
Tratamiento	10623.80	2	5311.90	33.61	<0.0001
Error	4267.00	27	158.04		
Total	14890.80	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 11.53549

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	97.10	10	3.73	a
R75	66.30	10	3.76	b
R50	52.00	10	4.40	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de hoja, poda 4 – 20 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.74	0.72	29.12

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	20961.27	2	10480.63	38.64	<0.0001
Tratamiento	20961.27	2	10480.63	38.64	<0.0001
Error	7324.10	27	271.26		
Total	28285.37	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 15.11303

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	88.20	10	6.69	a
R75	58.00	10	4.90	b
R50	23.50	10	3.55	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso seco de hoja, poda 1 – 08 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.03	0.00	22.59

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	17.11	2	8.56	0.38	0.6851
Tratamiento	17.11	2	8.56	0.38	0.6851
Error	602.35	27	22.31		
Total	619.46	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 4.33409

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	21.57	10	1.57	a
R75	19.85	10	1.43	a
R50	21.30	10	1.48	a

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso seco de hoja, poda 2 – 25 de octubre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.74	0.72	11.39

N = número de datos, R^2 = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	385.94	2	192.97	38.03	<0.0001
Tratamiento	385.94	2	192.97	38.03	<0.0001
Error	136.99	27	5.07		
Total	522.93	29			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F .

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 2.06690

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	24.85	10	0.74	a
R75	17.11	10	0.29	b
R50	17.38	10	0.94	b

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso seco de hoja, poda 3 – 09 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.35	0.30	18.65

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	80.42	2	40.21	7.27	0.0030
Tratamiento	80.42	2	40.21	7.27	0.0030
Error	149.27	27	5.53		
Total	229.70	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 2.15758

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	14.77	10	0.61	a
R75	12.24	10	0.71	b
R50	10.81	10	0.89	b

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso seco de hoja, poda 4 – 20 de noviembre de 2020

N	R ²	R ² Aj	CV
30	0.78	0.76	29.10

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	492.36	2	246.18	47.46	<0.0001
Tratamiento	492.36	2	246.18	47.46	<0.0001
Error	140.04	27	5.19		
Total	632.40	29			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 2.08977

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100	12.93	10	0.97	a
R75	7.53	10	0.64	b
R50	3.02	10	0.45	c

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de tallo

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.60	0.56	25.97

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	138391.29	8	17298.91	15.41	<0.0001
Tratamiento	138391.29	8	17298.91	15.41	<0.0001
Error	90953.70	81	1122.89		
Total	229344.99	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 29.81722

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	209.60	10	8.50	a
R100-S66:33	146.90	10	12.51	b
R100-S50:50	151.70	10	13.76	b
R75-S100:0	128.00	10	13.01	bc
R75-S66:33	145.50	10	10.96	b
R75-S50:50	115.40	10	12.44	cd
R50-S100:0	98.10	10	7.69	d
R50-S66:33	103.60	10	5.29	cd
R50-S50:50	62.30	10	7.82	e

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes (*p* > 0.05).

Peso seco de tallo

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.31	0.24	27.45

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2418.25	8	302.28	4.57	0.0001
Tratamiento	2418.25	8	302.28	4.57	0.0001
Error	5353.85	81	66.10		
Total	7772.10	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 7.23419

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	35.85	10	1.47	a
R100-S66:33	33.04	10	2.76	a
R100-S50:50	35.69	10	3.23	a
R75-S100:0	33.12	10	3.41	a
R75-S66:33	29.81	10	2.18	ab
R75-S50:50	29.71	10	3.09	ab
R50-S100:0	25.64	10	1.99	bc
R50-S66:33	20.16	10	1.03	c
R50-S50:50	23.55	10	2.88	bc

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Diámetro de tallo

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.40	0.35	12.93

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	75.62	8	9.45	6.89	<0.0001
Tratamiento	75.62	8	9.45	6.89	<0.0001
Error	111.10	81	1.37		
Total	186.72	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.04211

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	10.60	10	0.27	a
R100-S66:33	9.60	10	0.43	ab
R100-S50:50	9.80	10	0.33	ab
R75-S100:0	8.80	10	0.42	bc
R75-S66:33	9.30	10	0.52	b
R75-S50:50	9.30	10	0.30	b
R50-S100:0	7.40	10	0.27	d
R50-S66:33	8.80	10	0.42	bc
R50-S50:50	7.90	10	0.31	cd

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de raíz

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.30	0.23	52.84

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5600.81	8	700.10	4.26	0.0003
Tratamiento	5600.81	8	700.10	4.26	0.0003
Error	13298.55	81	164.18		
Total	18899.36	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 11.40143

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	23.22	10	1.74	bc
R100-S66:33	24.11	10	3.22	bc
R100-S50:50	25.56	10	2.03	bc
R75-S100:0	30.22	10	3.60	ab
R75-S66:33	41.56	10	8.72	a
R75-S50:50	20.44	10	3.42	bcd
R50-S100:0	11.78	10	1.63	d
R50-S66:33	24.33	10	5.01	bc
R50-S50:50	17.04	10	1.38	cd

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes (*p* > 0.05).

Peso seco de raíz

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.31	0.24	36.93

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	218.91	8	27.36	4.53	0.0001
Tratamiento	218.91	8	27.36	4.53	0.0001
Error	489.78	81	6.05		
Total	708.70	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 2.18806

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	6.89	10	0.38	b
R100-S66:33	6.44	10	0.72	b
R100-S50:50	7.00	10	0.71	b
R75-S100:0	6.22	10	0.68	bc
R75-S66:33	10.33	10	1.48	a
R75-S50:50	6.44	10	0.67	b
R50-S100:0	4.11	10	0.46	c
R50-S66:33	7.00	10	0.87	b
R50-S50:50	5.50	10	0.45	bc

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Longitud de raíz

N	R ²	R ² Aj	CV
90	0.54	0.49	19.19

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5196.05	8	649.51	11.83	<0.0001
Tratamiento	5196.05	8	649.51	11.83	<0.0001
Error	4445.69	81	54.89		
Total	9641.73	89			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 6.59214

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	34.80	10	1.67	cd
R100-S66:33	46.34	10	3.27	ab
R100-S50:50	46.44	10	2.62	ab
R75-S100:0	30.49	10	1.12	de
R75-S66:33	48.71	10	2.65	a
R75-S50:50	39.91	10	2.44	bc
R50-S100:0	25.08	10	1.35	e
R50-S66:33	41.76	10	2.45	b
R50-S50:50	33.98	10	2.64	cd

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Peso fresco de fruto

N	R ²	R ² Aj	CV
137	0.16	0.11	34.37

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13505.83	8	1688.23	3.08	0.0033
Tratamiento	13505.83	8	1688.23	3.08	0.0033
Error	70199.25	128	548.43		
Total	83705.08	136			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 16.87664

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	80.19	16	6.16	ab
R100-S66:33	74.65	17	5.71	abc
R100-S50:50	61.69	16	7.03	cd
R75-S100:0	82.44	16	7.80	a
R75-S66:33	65.47	15	4.74	bc
R75-S50:50	63.81	16	6.47	bc
R50-S100:0	67.86	14	4.61	abc
R50-S66:33	65.00	15	4.21	bc
R50-S50:50	45.83	12	5.07	d

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes (*p* > 0.05).

Peso seco de fruto

N	R ²	R ² Aj	CV
137	0.08	0.02	51.74

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	25.73	8	3.22	1.40	0.2016
Tratamiento	25.73	8	3.22	1.40	0.2016
Error	293.54	128	2.29		
Total	319.27	136			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 1.09133

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	3.31	16	0.38	ab
R100-S66:33	2.76	17	0.24	abc
R100-S50:50	2.75	16	0.34	abc
R75-S100:0	3.75	16	0.60	a
R75-S66:33	2.93	15	0.38	abc
R75-S50:50	2.88	16	0.38	abc
R50-S100:0	3.14	14	0.49	abc
R50-S66:33	2.13	15	0.24	c
R50-S50:50	2.58	12	0.26	bc

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Diámetro polar de fruto

N	R ²	R ² Aj	CV
137	0.11	0.06	13.67

N = número de datos, *R*² = coeficiente de determinación, *CV* = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1205.31	8	150.66	2.08	0.0427
Tratamiento	1205.31	8	150.66	2.08	0.0427
Error	9290.04	128	72.58		
Total	10495.35	136			

FV = fuente de variación, *SC* = suma de cuadrados, *gl* = grados de libertad, *CM* = cuadrado medio, *F* = prueba *F*.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 6.13944

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	64.17	16	1.84	ab
R100-S66:33	64.15	17	1.91	ab
R100-S50:50	58.83	16	2.35	bc
R75-S100:0	66.68	16	2.31	a
R75-S66:33	61.53	15	1.83	abc
R75-S50:50	59.61	16	2.06	bc
R50-S100:0	63.14	14	2.19	abc
R50-S66:33	64.63	15	2.70	ab
R50-S50:50	56.70	12	2.37	c

n = repeticiones por tratamiento, *EE* = error estándar, *R* = riego (%), *S* = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Diámetro ecuatorial de fruto

N	R ²	R ² Aj	CV
137	0.14	0.08	12.68

N = número de datos, R² = coeficiente de determinación, CV = coeficiente de variación.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

FV	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	667.60	8	83.45	2.58	0.0122
Tratamiento	667.60	8	83.45	2.58	0.0122
Error	4148.05	128	32.41		
Total	4815.65	136			

FV = fuente de variación, SC = suma de cuadrados, gl = grados de libertad, CM = cuadrado medio, F = prueba F.

Test: LSD Fisher Alfa = 0.05 DMS = 4.10243

Tratamiento	Medias	n	EE	Estadístico
R100-S100:0	48.16	16	1.48	a
R100-S66:33	45.95	17	1.36	ab
R100-S50:50	43.68	16	1.69	bc
R75-S100:0	47.43	16	1.34	ab
R75-S66:33	44.06	15	1.17	b
R75-S50:50	44.16	16	1.93	b
R50-S100:0	44.91	14	1.28	ab
R50-S66:33	44.61	15	1.16	ab
R50-S50:50	39.64	12	1.36	c

n = repeticiones por tratamiento, EE = error estándar, R = riego (%), S = sustrato turba-perlita (v/v). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).