



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y
PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DE PLÁNTULA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) A TEMPERATURA ALTA

RAÚL ALFONSO RODRÍGUEZ RUELAS

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO.

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Raúl Alfonso Rodríguez Ruelas, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor José Alfredo Carrillo Salazar, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Modelación de la respuesta de plántula de tomate (Solanum lycopersicum L.) a temperatura alta

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 30 de julio de 2018


Firma del
Alumno (a)


José Alfredo Carrillo Salazar
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Modelación de la respuesta de plántula de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) a temperatura alta**, realizada por el alumno: **Raúl Alfonso Rodríguez Ruelas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
FISIOLÓGIA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO 
DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

ASESOR 
DR. OSCAR JAVIER AYALA GARAY

ASESOR 
DR. JUAN MANUEL GONZÁLEZ CAMACHO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2018

MODELACIÓN DE LA RESPUESTA DE PLÁNTULA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) A TEMPERATURA ALTA

Raúl Alfonso Rodríguez Ruelas, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

La calidad de plántula de tomate depende de variables morfológicas y de desarrollo, sensibles a temperaturas altas prevaletientes en sistemas de cultivo intensivo bajo cubierta plástica. Se cultivaron plántulas de tomate tipo saladette del híbrido DRD 8551 (SEMINIS®) en microtúneles cubiertos con plástico lechoso (50 % de transmisión), bajo seis tratamientos de temperatura mínima y máxima ($T_{mín} - T_{máx}$): 12-29 °C (T_1), 14-31 °C (T_2), 12-34 °C (T_3), 13-34 °C (T_4), 13-38 °C (T_5) y 13-40 °C (T_6). Se obtuvo un valor de grados días desarrollo (GDD) de 114 para primera hoja y 184 para segunda hoja. La temperatura máxima promedio ($T_{máx}$) en el rango de 29 a 40 °C, así como otras variables derivadas de la temperatura tuvieron efecto ($P \leq 0.05$) sobre las fracciones de biomasa asignadas a tallo y hoja; los tratamientos T_6 y T_1 presentaron los mayores promedios en esas variables; mientras que también hubo efecto de la temperatura en la acumulación de biomasa en tallo ($P \leq 0.05$). La longitud de tallo se correlacionó con la temperatura promedio diurna (T_{md}), la temperatura promedio diaria (T_{m24h}) y la temperatura promedio nocturna (T_{mn}) con $R^2=0.75$, 0.79 y 0.71 respectivamente. T_4 tuvo la mayor longitud y la menor fue para T_1 . El área foliar específica ($m^2 g^{-1}$) se correlacionó con T_{mn} ($R^2=0.83$); el mayor valor fue en el tratamiento T_4 y el menor, el tratamiento T_1 . El efecto de la temperatura en la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) $g^{-1} MJ^{-1}$ no fue significativo ($P > 0.05$) ni el coeficiente de extinción; aunque la EUR tuvo una $R^2=0.73$ con $T_{máx}$. Las cinéticas de fotosíntesis presentaron 1000 μmol fotones $m^{-2} s^{-1}$ como punto de saturación por luz bajo las temperaturas de 28, 31 y 40 °C. Sin embargo, el punto de compensación presentó diferencias de 120, 6 y 89 μmol fotones $m^{-2} s^{-1}$ a 28, 31 y 40 °C respectivamente. El rendimiento cuántico fue similar

(0.06 mol de CO₂ mol⁻¹ de fotones) bajo las temperaturas de 28, 31 °C, y de 0.04 μmol fotones m⁻² s⁻¹ para 40 °C. El modelo propuesto presentó un coeficiente de correlación de 0.82 en la predicción de biomasa total acumulada, no obstante, tiende a sobreestimar esta variable con un error medio porcentual de 46.7 %. La cantidad de biomasa acumulada en tallo obtuvo un error de 50.7 % con una tendencia a subestimar. Contrario a esto, la biomasa acumulada en hoja fue sobreestimada por el modelo en 53.8 %. La biomasa acumulada en raíz fue la que mejor tendencia presentó, sin embargo, su porcentaje de error fue el más alto (59.7 %). La variable $T_{m\acute{a}x}$ afectó las relaciones fuente-demanda, lo que causó diferencias en la longitud del tallo, una de las características que definen la calidad de la plántula de tomate.

Palabras clave: Distribución de materia seca, calidad de plántula, longitud de tallo, temperatura máxima, acumulación de biomasa.

MODELING the response of SEEDLING of tomato (*Solanum lycopersicum*) at high temperature

Raúl Alfonso Rodríguez Ruelas, M. Sc.

Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

The quality of seedling of tomato depends on morphological variables and development, sensitive to high temperatures prevailing in intensive farming under plastic cover systems. Seedlings of the DRD 8551 (SEMINIS®) hybrid saladette tomatoes were cultivated in greenhouses covered with Milky plastic (50% transmission), under six treatments of minimum and maximum temperature (T_{\min} - T_{\max}): 12-29 °C ($T1$), 14-31 °C ($T2$), 12-34 °C ($T3$), 13-34 °C ($T4$), 13-38 °C ($T5$) y 13-40 °C ($T6$). A value of degree days development (GDD) 114 for the first leaf and 184 for second sheet was obtained. The average maximum temperature (T_{\max}) in the range of 29 to 40 °C, as well as other variables derived from the temperature had effect ($P \leq 0.05$) on the fractions of biomass allocated to stem and leaf; the treatments $T6$ and $T1$ respectively had higher averages in these variables; while there was also the temperature effect on the accumulation of biomass in stem ($P \leq 0.05$). Stem length was correlated with an $R^2 = 0.75$, 0.79 and 0.71 with the diurnal average temperature (T_{md}), the daily average temperature (T_{m24h}) and the temperature average night (T_{mn}) respectively. $T4$ had the longest while the lowest was for $T1$. $T4$ also presented the greater leaf area index and an associated to T_{mn} whit a $R^2 = 0.67$. Specific leaf area ($m^2 g^{-1}$) correlated with T_{mn} ($R^2 = 0.83$); the highest value was the lowest in treatment $T1$ and $T4$ treatment. The effect of temperature on radiation use efficiency (RUE) $g^1 MJ^{-1}$ was not significant ($P > 0.05$) nor the extinction coefficient, although the RUE was correlated with a $R^2 = 0.73$ with T_{\max} . The kinetics of photosynthesis were 1000 μmol photons $m^{-2} s^{-1}$ as saturation point by light under temperatures of 28, 31 and 40 °C. However, the compensation point present differences of 120, 6 and 89 μmol photons $m^{-2} s^{-1}$ to 28, 31 and 40 °C

respectively. The quantum yield was similar ($0.06 \text{ mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ photons}$) under temperatures of 28, 31 °C, and $0.04 \text{ mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ photons}$ to 40 °C. The proposed model presented a correlation coefficient of 0.82 in the prediction of total accumulated biomass, however, tends to overestimate this variable with a mean percent error of 46.72 %. The amount of biomass in stem cumulada got an error of 50.7 % with a tendency to underestimate. Contrary to this, the biomass accumulated in sheet was overestimated by the model in a 53.8 %. The biomass accumulated at root was the one that better trend presented, however, its percentage of error was the highest (59.7 %). $T_{m\acute{a}x}$ affected relations Source-Request, which caused differences in the length of the stem, one of the characteristics that define the quality of the tomato seedling.

Key words: Dry matter distribution, seedling quality, stem length, maximum temperature, biomass allocation.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por financiar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Programa de Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal.

A mi Consejero, Dr. José Alfredo Carrillo Salazar, quien día a día fue guiándome en toda esta aventura académica. Por sus consejos, que sin duda me permitieron crecer como persona. Por mostrarme siempre con el ejemplo que las cosas se deben realizar bajo un marco de honestidad y ética profesional. Porque tuvo la paciencia y comprensión cada vez que cometía un error o afloraba mi léxico coloquial. Porque cada vez que solicité su apoyo siempre me extendió su mano. En verdad, no tengo palabras para agradecerle todo lo que ha hecho por mí, mil gracias.

A mi Asesor, Dr. Oscar Javier Ayala Garay. Porque siempre estuvo al pendiente de que no me faltara nada en este proyecto. Por haberme brindado la fluidez y claridad en los momentos difíciles. Por sus aportaciones académicas, consejos y paciencia. Porque siempre ha buscado la forma de mantener un equipo de trabajo unido, muchas gracias.

A mi Asesor, Dr. Juan Manuel González Camacho. Por su paciencia infinita. Porque siempre fue objetivo en cada uno de sus aportes al proyecto. Por permitirme la reconciliación con la programación, actividad que tenía descartada desde el 2002; y universo que vuelvo a retomar, con conocimientos y cimientos más sólidos, gracias a sus enseñanzas.

A los tres, mil gracias, quedo en deuda con ustedes.

A la M.C. Diana Garfias Sánchez. Por ese tacto tan centrado que tiene para expresar su opinión o sugerencia de una manera correcta y asertiva. Porque siempre me estuvo apoyando en todo lo que se requería en campo. Por brindarme sus consejos y sabiduría, muchas gracias.

Al laboratorio de Fisiotecnia-Vegetal quienes me aceptaron en su espacio de trabajo. Particularmente al Dr. Víctor A. González Hernández, Dr. Nicacio Cruz Huerta y M.C. Iván Ramírez Ramírez por su ayuda constante en la resolución de mis dudas académicas. Al señor Juan Carlos, Sagrario y Víctor, por su ayuda en el laboratorio.

A mis dos hermanos de consejero (Yamir y Ardina); quienes siempre estuvieron ahí para apoyarme en todo. A Marlen (no creí que hubiera alguien más dedicado que yo) por aguantarme tantas horas y hacerme funcionar las neuronas. A Vicky y a Faby con quienes inicié esta odisea; ustedes fueron mis primeras compañeras de clase, y entienden lo difícil que fue ponerse al corriente académicamente siendo

foráneos y de otra especialidad. A Sandoval quien es la viva imagen de que la inteligencia, la ironía y el sarcasmo coexisten en un solo ser. A Rosendo, Hernán y Ana, los mejores vecinos que he tenido en mi vida. A los plebes de Fruticultura y adjuntos, quienes siempre me recibieron con amabilidad en sus buenas fiestas (Efraín, Juan bee, Manolo y Jesús “los gemelos”, Uriel, Kiagua, Yoshua y el Fritz). A mis compañeros de genética, de los que adquirí un amplio glosario de términos de mejoramiento en cada reunión que hacíamos. Al grupo del Pride 2018 (Yam, Corrales, Kike, Karla, Yun y Vicky) por esas aventuras inesperadas que le dieron un respiro a la presión que tenía en mi mente. A Lugo y Joel, por su ayuda en campo y su apoyo constante.

En mi mente y corazón hay tantas personas a las que quiero agradecerles porque han hecho de este proceso una estancia agradable; además, siempre me ayudaron a sobrellevar mis problemas académicos y personales. Su comprensión y cariño siempre lo llevaré conmigo. Como muchos de ustedes he dejado cosas atrás; algunas buenas, otras malas y sin duda, una de la que me arrepentiré toda la vida. Pero no cabe duda que cada decisión que tomamos es un reflejo directo de nuestro deseo interno; que consiente e inconscientemente nos impulsa. ¿A dónde nos llevará este camino?, Aun no lo sé, pero si por azares del destino nuestros caminos se separan, yo siempre llevaré conmigo algo de ustedes.

Hoy sé que la vida está compuesta de ciclos cerrados o abiertos, e incluso algunos que me atrevo a definir como pequeños y fugaces bucles prematuros. Pero es claro que cada uno de ellos posee la habilidad de coexistir bajo nuestra realidad (tiempo y espacio); esperando ser comprendido o incorporado a nuestra psique. O como vulgarmente se dice: “todas las cosas pasan por alguna razón”.

Con este documento se cierra un ciclo. Un ciclo de aprendizaje académico, social y humano. Donde aprendí más sobre mis habilidades, fortalezas, deficiencias y debilidades como ser humano. Para mí, la mejora constante de un ser humano es la capacidad que tenemos para aprender de nuestro ambiente. Y si me llevo todo este aprendizaje es porque en este ciclo tuve la fortuna de rodearme de gente como ustedes. Por eso les doy las gracias.

"No sólo no hubiéramos sido nada sin ustedes, sino con toda la gente que estuvo a nuestro alrededor desde el comienzo. Algunos siguen hasta hoy... Gracias totales (Cerati, 1997)".

DEDICATORIA

A mis padres:

Hipólita Ruelas Ruelas y **Alfonso Rodríguez Sánchez**, por su comprensión, cariño y fe en mí; a pesar de que mucho tiempo estuve fuera de lugar en mi vida.

“Mas era necesario hacer fiesta y regocijarnos, porque este tu hermano era muerto, y ha revivido; se había perdido, y es hallado”.

Mucho tiempo ha pasado desde que inicié este cambio, también sé que elegí un camino largo y un poco tarde; pero sé que es el correcto. Y créanme cuando les digo que todo el amor que me han brindado siempre impidió que me metiera en problemas.

Con todo mi cariño y amor les dedico este trabajo; porque ustedes fueron los principales artífices, la fuerza que me impulsó todos los días y el sustento mental que me mantuvo a flote.

A mi hermano:

Fausto Ramón Rodríguez Ruelas, la persona que más amo y quiero en este planeta. Te dedico este trabajo porque siempre crees en mí, y en todas las ideas locas que se me vienen a la mente. Por tu apoyo incondicional y ser mi ejemplo a seguir. Bro recuerda, siempre has sido el listo de la familia.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo general.....	5
2.2. Objetivos específicos	5
III. HIPÓTESIS	6
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
4.1. Características generales del cultivo	6
4.1.1. Importancia económica	6
4.1.2. Historia y origen	7
4.1.3. Descripción Taxonómica	8
4.1.4. Descripción Botánica.....	9
4.2. Factores ambientales.....	9
4.2.1. Radiación solar.....	9
4.2.2. Temperatura.....	12
4.3. Principales procesos fisiológicos de las plantas	13
4.3.1. Fotosíntesis	13
4.3.2. Respiración	15
4.4. Influencia de la radiación solar y temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas.....	15
4.5. Modelación	19
4.5.1. Importancia de la modelación	19
4.5.2. Historia de los modelos	20
4.5.3. ¿Qué es un modelo?.....	22
4.5.4. Modelo de predicción para tomate	23
4.6. Conclusiones de revisión de literatura	25
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
5.1. Sitio experimental	26
5.2. Material genético	26
5.3. Construcción de microtúneles.....	27

5.4. Control de la temperatura del aire al interior de los microtúneles	27
5.4.1. Temperatura del aire al interior de los microtúneles.....	27
5.4.2. Sistema de control.....	29
5.4.3. Construcción del dispositivo central de control	29
5.4.4. Dispositivos de entrada	29
5.4.5. Dispositivos de salida.....	30
5.4.6. Dispositivo de comunicación	30
5.4.7. Sistema de monitoreo	30
5.4.8. Funcionamiento del sistema de control	30
5.5. Tratamientos.....	31
5.6. Fase experimental	31
5.6.1. Fecha de siembra, método de siembra y labores culturales	31
5.7. Variables y parámetros determinados	33
5.7.1. Variables climáticas.....	33
5.7.2. Variables fenológicas	34
5.7.3. Variables fisiológicas.....	35
5.7.4. Cálculo de parámetros de las plántulas de tomate.....	37
5.7.5. Rendimiento cuántico, punto de saturación por luz, punto de compensación por luz, y tasa de asimilación neta.	38
5.8. Análisis estadístico	38
5.9. Modelo de crecimiento.....	39
5.9.1. Generalidades.....	39
5.9.2. Construcción del modelo.....	39
5.9.3. Componentes del modelo	40
5.9.4. Evaluación del desempeño o precisión del modelo de crecimiento	48
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
6.1. Radiación solar diaria	49
6.2. Temperatura del aire.....	50
6.3. Etapas Fenológicas	55
6.4. Área foliar específica.....	56
6.5. Índice de área foliar	58
6.6. Coeficiente de Extinción	61
6.7. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética.	62
6.8. Rendimiento cuántico	63
6.9. Repartición de Asimilados	65

6.10. Acumulación de biomasa.....	67
6.11. Variables morfológicas.....	68
6.12. Correlaciones entre las variables derivadas de la temperatura del aire y las variables y parámetros de las plántulas de tomate.....	71
6.13. Modelo de crecimiento de la plántula de tomate.....	73
6.13.1. Modelación de la repartición de asimilados.....	73
6.13.2. Nivel de ajuste del modelo propuesto	74
VII. DISCUSION GENERAL.....	76
VIII. CONCLUSIONES	80
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	81
X. ANEXO	93
10.1. Fotografía del circuito del sistema de control.....	93
10.2. Código para PIC programable ARDUINO MEGA®.....	94

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Producción de tomate por estados en 2016.	7
Cuadro 2. Descripción taxonómica de tomate.	8
Cuadro 3. Dimensiones de cada microtúnel.	27
Cuadro 4. Patrones de temperatura de aire controlada (T_{ac}) por hora (h) en el rango de 6 a 27 °C (Microtúnel 1), 6 a 35 °C (Microtúnel 2) y 6 a 40 °C (Microtúnel 3).	28
Cuadro 5. Descripción de tratamientos.	31
Cuadro 6. Definición de tratamientos por fecha de cultivo.	32
Cuadro 7. Cálculo de la conductancia del mesófilo (gm).	43
Cuadro 8. Cálculo de la máxima capacidad fotosintética (F_{mm})	45
Cuadro 9. Estadísticos descriptivos y prueba de medias de radiación solar diaria transmitida por el plástico e incidente ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) sobre plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	49
Cuadro 10. Comportamiento real de la temperatura del aire (T_a) dentro de los ambientes bajo microtúneles cubiertos con plástico lechoso, para cultivar plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).	51
Cuadro 11. Tratamientos experimentales definidos con base en la temperatura del aire mínima (T_{min}) y máxima (T_{max}) dentro de los ambientes bajo microtúneles cubiertos con plástico lechoso.	53
Cuadro 12. Variables derivadas de la temperatura del aire durante las dos fechas de cultivo (F1 y F2) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (F2).	54
Cuadro 13. Grados días desarrollo (GDD) para alcanzar la primera y segunda hoja extendida de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).	56
Cuadro 14. Área foliar específica (AFE, $m^2\ g^{-1}$) de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	57
Cuadro 15. Media del índice de área foliar (IAF, $m^2\ m^{-2}$) y absorbencia (%) del follaje por tratamiento de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).	58
Cuadro 16. Ajuste de modelos matemáticos al aumento del índice de área foliar (IAF) en función de los grados día de desarrollo (GDD) de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	60
Cuadro 17. Coeficiente de extinción (k) de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).	62

Cuadro 18. Eficiencia en el uso de la radiación completa (EUR, g MJ ⁻¹) en la banda fotosintética (PAR) de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	62
Cuadro 19. Media de porcentaje de fotosintatos enviados a raíz (Fr, %), tallos (Ft, %) y hojas (Fh, %) en plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	65
Cuadro 20. Medias de biomasa seca (g m ⁻²) de hoja (Bsh), raíz (Bsr), tallo (Bst) y total (Bstot) por tratamiento a los 22 dde, de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	68
Cuadro 21. Medias de longitud de tallo (Lt, cm), ancho de tallo (At, mm), longitud de raíz (Lr, cm) y área foliar (AF, cm ² planta ⁻¹) por tratamiento a los 22 dde, de plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).	69
Cuadro 22. Correlaciones (R ²) entre variables derivadas de la temperatura del aire y parámetros y variables medidas en plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	72
Cuadro 23. Porcentaje de error total y por tratamiento del modelo propuesto para las variables Bsh, Bst, Bsr y Bstot medidas en plántulas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>).....	76

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Radiación solar diaria (R_{St} , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) transmitida por el plástico lechoso que cubre los microtúneles del a) 26 de junio al 16 de julio 2017 (F1) y b) 17 de agosto al 10 de septiembre de 2017 (F2)..... 50
- Figura 2.** Índice de área foliar (IAF) observado (●) y modelado con la función exponencial (—) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) en función de grados días desarrollo (GDD)..... 61
- Figura 3.** Cinéticas fotosintéticas en 3 diferentes temperaturas. Los puntos representan el valor promedio para los 3 diferentes ambientes (●) 31 °C, (■) 28 °C, (▲) 40 °C y (–) modelo de ajuste. 64
- Figura 4.** Porcentaje de fotosintatos enviados a raíz (Fr) tallo (Ft) y hoja (Fh) de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (F2). T1 (12/29 °C, ○); T3 (12/34 °C, □); T6 (13/40 °C, ◇); T2 (14/31 °C, ◊); T4 (13/34 °C, △); T5 (13/38 °C, ▽); la línea continua es la tendencia de los datos..... 66
- Figura 5.** a). a). Modelo para longitud de tallo usando la media de todos los tratamientos (–), primera derivada del modelo ajustado para longitud de tallo (---), muestreos de longitud de tallo para T1, T2, T3, T4, T5 y T6 (●); b). modelo para IAF ($m^2\ m^{-2}$), modelo ajustado para IAF a partir de todos los tratamientos (●) y c). modelo ajustado para radiación absorbida (%) (◆). de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*)..... 70
- Figura 6.** Modelo para la predicción del porcentaje de asimilados asignados a hoja (Fh (%)) en función de los días de cultivo (dde) (–). Porcentaje de asimilados asignados a hoja en 22 dde (●)..... 73
- Figura 7.** Biomasa total observada (●) y modelada (○) de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) de los tratamientos a) T1(12-29 °C), b) T2 (14-31 °C), c) T3 (12-34 °C), d) T4 (13-34 °C), e) T6 (13-40 °C), f) T5 (13-38 °C), cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (F2)..... 74
- Figura 8.** Precisión de un modelo mecanicista derivado del modelo SUCROS para calcular la producción de biomasa seca de a) Bstot, b) Bsh, c) Bst, y d) Bsr, de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (F2). La línea continua representa el valor óptimo de ajuste entre modelado y observado, mientras que la línea punteada representa la regresión lineal entre datos observados y modelados. 75

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) tiene su origen silvestre en la costa y en los Andes de Ecuador, Perú, y Chile, además de encontrarse en las Islas Galápagos (Razdan y Mattoo, 2006), pero su domesticación posiblemente ocurrió en México (Rodríguez, 1998). Esta hortaliza tiene gran importancia a nivel mundial (Razdan y Mattoo, 2006). Los principales países productores son: China, India, Estados Unidos, Turquía y Egipto (FIRA, 2016). En México, esta actividad agrícola generó ingresos en el 2014 por 13,146 mdp (Ríos-Osorio *et al.*, 2014).

El éxito en la producción de hortalizas en nuestro país se debe a la adquisición de tecnología de punta desde hace 20 años, lo cual ha permitido pasar de sistemas tradicionales a sistemas tecnificados (Berrospe, 2010). Una de estas tecnologías es la producción de plántulas de tomate en invernadero; actividad agrícola en la cual los productores se han especializado (Berrospe, 2010) y con la cual el crecimiento y desarrollo pueden ser controlados por medio del manejo de los factores edafo-climáticos y nutrimentales (Cerny *et al.*, 2004).

La obtención de altos rendimientos en la producción de tomate en campo abierto o invernadero depende en gran medida de la calidad de la plántula (Balaguera *et al.*, 2008). La mayoría de plantas utilizadas para la producción de tomate provienen de plántulas cultivadas en charolas en invernadero (Parra-Terraza *et al.*, 2010); caracterizadas por presentar raíces bien desarrolladas para adaptarse a condiciones de estrés (Villegas *et al.*, 2001); y además, son más uniformes y precoces que las plántulas producidas en campo (Castorena *et al.*, 2005); razón por la cual esta actividad es de gran interés para los productores de hortalizas (Herrera *et al.*, 2008).

En la literatura se plantean diferentes variables fenotípicas, fenológicas y de crecimiento como atributos de una plántula de calidad apta para el trasplante. Para Espinosa (2004) y Linares (2004) las plántulas deben de tener entre 10 y 15 cm de

altura. Según Rodríguez *et al.* (2001), las plántulas deben presentar de 6 a 7 hojas bien desarrolladas y un buen sistema radical. Escobar y Lee (1994) coinciden con los autores anteriores en cuanto a la altura (10 a 15 cm) y agregan que la plántula debe de tener un mínimo de cuatro hojas formadas; además, hacen una descripción de la coloración y morfología que debe de poseer cada órgano: las hojas deben de ser de color verde en el haz y ligeramente púrpura en el envés, erectas, bien desarrolladas, sin entorchamientos (plegamientos del borde de la hoja hacia el haz o el envés de una hoja), un tallo con una coloración ligeramente púrpura en la base, raíces blancas y delgadas. Una descripción más agronómica y menos ambigua es la que presentan Escobar y Lee (1994), que especifican como óptimo una altura de planta de 20 a 30 cm, 6 a 7 hojas verdaderas, 6 a 8 g de peso de la parte aérea, 11 a 12 % de materia seca, 15 g de biomasa en fresco en invierno y 30 g en verano. Este punto óptimo de calidad de la plántula en el transplante debería permitir que la planta en producción alcance el rendimiento máximo.

Una de las variables mejor relacionadas con el crecimiento de las plantas es la ganancia o incremento de materia seca total, ya sea a nivel planta o dosel (Goudriaan y Van Laar, 2012). Esto se debe a que la acumulación de biomasa es una variable cuantitativa que está estrechamente relacionada con el final de la cosecha y el rendimiento (Chen *et al.*, 2018). Desde el siglo pasado Wien (1997) describe en sus trabajos sobre fisiología de cultivos vegetales que una mayor biomasa seca en hojas, posiblemente esté relacionada con mayor área foliar y por consiguiente con una mayor capacidad fotosintética. Posteriormente estos asimilados producidos por el aparato fotosintético pueden ser usados para la formación de raíces que ayuden a disminuir daños cuando ocurre estrés hídrico. En la actualidad, diversos modelos de predicción del rendimiento incluyen la estimación de biomasa y su repartición a lo largo del ciclo de cultivo, ya que influyen directamente en el proceso fotosintético, la producción de frutos y asimilación de nutrientes, entre otros (Ma *et al.*, 2016).

De acuerdo con Cantliffe (1993), bajo condiciones de cultivo en Florida, no hay diferencias en el rendimiento de tomate cuando se transplantan a las 5 y 6 semanas comparadas con plantas más jóvenes transplantadas a las 4 y 5 semanas durante la primavera y el otoño, respectivamente; lo que sí encontraron fue que las plantas más jóvenes reanudan su crecimiento más rápido y puede producirse a menor costo, porque permanecen menos tiempo en las charolas en invernadero.

A pesar de existir diversos criterios, para definir la calidad de las plántulas es el consumidor (productor de hortalizas) en la práctica, quien la define y en menor proporción, el vendedor (productor de plántulas) (Leskovar, 2001). Lo que dificulta obtener una norma para estandarizar la calidad de plántula de tomate (Noordegraaf, 1992).

De acuerdo con Hazra *et al.* (2007) los tomates crecen en regiones tropicales y subtropicales donde experimentan con frecuencia altas temperaturas, y pueden sufrir estrés a una temperatura media de 28 a 29 °C. Lo cual, está a solo unos cuantos grados sobre el rango de temperatura óptima que es de 21 a 24 °C. Tal estrés causado por una temperatura moderadamente alta puede que no altere funciones bioquímicas fundamentales en las células, aunque Bitá y Gerats (2013) consideran que en plantas expuestas a 5 °C sobre la temperatura óptima de crecimiento presentan cambios en la organización de las estructuras celulares, incluyendo de organelos, citoesqueleto y las funciones de la membrana acompañado por una disminución de la síntesis normal de proteínas y la transcripción y reacomodo de proteínas de estrés térmico, la producción de ácido abscísico, antioxidantes y otras moléculas protectoras.

También, se ha observado que con altas temperaturas disminuye el amarre de frutos; en consecuencia el rendimiento. A 35 °C por 30 días se afecta el metabolismo oxidativo del tomate; lo que causa una disminución del peso de la biomasa de la parte aérea porque disminuye la tasa neta de asimilación (Wahid, 2007). En genotipos tolerantes al calor, aumenta la relación de clorofila a/b y disminuye la

relación clorofila/carotenoides; además, hay cambios en el metabolismo y translocación de carbohidratos (Hazra *et al.*, 2007).

El efecto pronunciado de la temperatura en la arquitectura de la planta se demuestra en *Arabidopsis*, cuando bajo condiciones idénticas de iluminación, y bajo tres niveles de temperatura (16, 22 y 28 °C) se encontró que las plantas a 22 °C presentaron mayor biomasa y área foliar. A 16 °C, las plantas fueron enanas y presentaron rosetas compactas y adaptación fenotípica a bajas temperaturas. En contraste, a 28 °C se observó mayor elongación de peciolo, hiponastia de hojas, y área foliar reducida, fenotipos comparables a los que se observan bajo condiciones de sombra (Franklin, 2009).

Sin duda, resulta una idea más asertiva determinar cómo la temperatura afecta la calidad de una plántula a partir del uso de variables de crecimiento y desarrollo del cultivo; para lo cual, los modelos matemáticos son una buena opción para integrar estas variables. Su construcción nos ayuda en la prueba de hipótesis, permiten generar escenarios de predicción, y describen sistemas complejos (Lentz, 1998). También, los modelos matemáticos son herramientas útiles en la planeación de la producción y la toma asertiva de decisiones; además, nos ayudan a tomar control en el manejo del cultivo (Lentz, 1998).

Los modelos de predicción pueden construirse genéricamente o de forma universal como es el modelo SUCROS (a Simple and Universal Crop Growth Simulator) el cual es capaz de calcular variables de importancia agronómica (estado de desarrollo, índice de área foliar, biomasa de hojas verdes, secas, raíces, tallos) con base en procesos fisiológicos fundamentales como la respiración y la fotosíntesis (López-Cruz *et al.*, 2014). SUCROS sin duda, es considerado como la base para el desarrollo de modelos más complejos tanto en campo abierto (Bouman *et al.*, 1996) como en invernadero (Heuvelink, 1995a).

Actualmente existen modelos para la predicción del crecimiento de tomate, tales como TOMGRO, TOMSIM y TOMPOUSSE. Los cuales están validados bajo densidades de producción, desarrollo de frutos y otras variables estado relacionadas con el manejo del cultivo ya establecido en invernadero (López-Cruz *et al.*, 2005) Sin embargo, estos modelos no están validados para una producción intensiva bajo un invernadero especializado en la producción de plántula de calidad y alto vigor. Por lo tanto, para la producción de plántulas de tomate se requiere un modelo que sea capaz de predecir el crecimiento bajo diferentes condiciones de cultivo. El establecimiento de variables estado que sean representativas del crecimiento y desarrollo de la plántula de tomate, así como la determinación de parámetros que estén asociados directamente con la calidad y vigor de la plántula como altura de planta, diámetro de tallo, densidad de raíces, área foliar, biomasa seca, altura de tallo y número de hojas.

En esta investigación se plantean los objetivos general y específicos siguientes:

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar el efecto de la temperatura máxima en el crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate.

2.2. Objetivos específicos

Determinar el efecto de la temperatura máxima en las variables y parámetros de crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate.

Adaptar un modelo mecanicista al crecimiento y desarrollo de la plántula de tomate bajo condiciones de microtúneles de plástico.

III. HIPÓTESIS

La temperatura máxima del aire bajo un ambiente intensivo de producción para plántulas en invernadero puede provocar cambios en el crecimiento y desarrollo de las plántulas de tomate que afectan su calidad al trasplante.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Características generales del cultivo

4.1.1. Importancia económica

EL tomate (*Solanum lycopersicum*) es la cuarta hortaliza más producida en el mundo (Razdan y Mattoo, 2006). Los principales países productores son: China, India, Estados Unidos, Turquía y Egipto; juntos produjeron en 2013 un total de 163.96 millones de toneladas (FIRA, 2016). En México el tomate es considerado una de las hortalizas más importantes (Atlas Agroalimentario, 2017). La producción de tomate en 2016 fue de 3,349 mil toneladas con una participación nacional de 21.8 % en la producción de hortalizas (Atlas Agroalimentario, 2017). Los principales productores en orden descendente son: Sinaloa, San Luis Potosí Michoacán, Baja California, Zacatecas, Jalisco, Baja California Sur, Sonora Morelos y Puebla (Atlas Agroalimentario, 2017). Cuadro 1.

Cuadro 1. Producción de tomate por estados en 2016.

Estado	Volumen	
	Mt	Participación
Sinaloa	924,153	27.59%
San Luis Potosí	306,621	9.16%
Michoacán	235,785	7.04%
Baja California	226,062	6.75%
Zacatecas	191,654	5.72%
Jalisco	158,232	4.72%
Baja California Sur	135,223	4.04%
Sonora	128,038	3.82%
Morelos	122,959	3.67%
Puebla	119,825	3.58%
Resto	800,602	23.90%

4.1.2. Historia y origen

Se considera que el centro de origen del tomate (*Solanum lycopersicum*) es en América del Sur, entre el área de Perú y Ecuador; y a partir de esa región se extendió a México y toda América tropical Santiago *et al.* (1998). Sin embargo, se han puesto a evaluación dos hipótesis sobre el centro de domesticación de este cultivo señalando a México y Perú como los principales lugares de domesticación (Razdan y Mattoo, 2006). En un estudio ecléctico realizado a través de cuatro criterios (botánico, arqueológico y paleontológico, histórico y filológico) se ha establecido que el lugar de origen de *Solanum lycopersicum* es Perú (De Candolle, 1885), y esto fue apoyado por otros autores como Muller (1940), Razdan y Mattoo (2006). Por otro lado, Jenkins (1948) considera que la domesticación de este cultivo se dio en México; este autor se basa en tres argumentos; el primero, en la confusión en cuanto al nombre común que le dieron diferentes autores. El segundo argumento se basa en que no existe ninguna evidencia de domesticación en la época precolombina en América del Sur; por último, señala que existe más variabilidad de

cultivares en México (Razdan y Mattoo, 2006). En cuanto al verdadero y único lugar de domesticación del tomate (*Solanum lycopersicum*), Razdan y Mattoo (2006) señalan que se puede considerar como un caso sin resolver. Bajo un marco histórico y las evidencias que estos autores presentan, se ha considerado a Mexico como el centro más importante de domesticación de *Solanum lycopersicum* (Rodríguez, 1998). La palabra tomate deriva del náhuatl “tomatl”, que se usaba genéricamente para describir frutos con forma globosa, generalmente bayas dehiscentes, poliespérmicas y con un endocarpio mucilaginoso (Nuez, 1995).

4.1.3. Descripción Taxonómica

El nombre científico del cultivo del tomate ha sufrido algunos cambios taxonómicos y de nomenclatura. En la base de datos de CONABIO y USDA siguen usando el nombre *Solanum lycopersicum* L. var. *cerasiforme* (Dunal) Spooner, J. Anderson & R.K. Jansen. En el U.S. National Plant Germplasm System está clasificado como *Lycopersicon esculentum* Mill. var. *cerasiforme* Alef (Vibrans, 2005). Aun no existe una variación que sea aceptada de manera general (Vibrans, 2005). Pero en nuestra investigación usaremos la clasificación descrita por Linneo ya que es la aceptada por CONABIO (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción taxonómica de tomate.

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	Solanum
Subgénero	Potatoe
Sección	Petota
Especie	<i>S. lycopersicum</i>

4.1.4. Descripción Botánica

La planta de tomate *Solanum lycopersicum* L. es una planta con porte arbustivo, la cual desarrolla de forma rastrera semierecta o erecta de crecimiento determinado e indeterminado (Rick, 1978 citado por (Nuez, 1995). Tiene un sistema radical que está formado por una raíz principal y raíces secundarias, y en algunas ocasiones pueden presentarse raíces adventicias (Nuez, 1995). Presenta la estructura de un simpodio, su tallo principal forma de 6 a 12 hojas con filotaxia de 2/5, esto ante es de que la yema principal se transforme en inflorescencia (Nuez, 1995). En cuanto al tallo, su diámetro en la base tiene de 2 a 4 cm de diámetro y presenta pelos glandulares y no glandulares (tricomas) que salen de la epidermis (Nuez, 1995). La hoja de tomate presenta una forma compuesta, con un foliolo terminal y hasta 8 grandes foliolos laterales; los foliolos usualmente son peciolos y lobulados irregularmente con los bordes dentados (Nuez, 1995). La flor de tomate es perfecta regular e hipógina, el perianto consta regularmente de 5 sépalos, 5 pétalos dispuestos en intervalos de 135° dándole una forma helicoidal, 5 estambres que se alternan con los pétalos y un ovario bi o plurilocular (Nuez, 1995).

4.2. Factores ambientales

4.2.1. Radiación solar

Las ondas electromagnéticas están formadas por dos campos (uno eléctrico y otro magnético) que oscilan en la misma frecuencia, pero en ejes perpendiculares entre sí, los cuales se propagan a 3×10^8 m/s (López y del Arco, 2010).

Estas se encuentran ordenadas en una tabla llamada espectro electromagnético y están clasificadas en función de su frecuencia (ν) y longitud de onda (λ) (Castillo y Jordán, 1999). Esta clasificación es considerada un intervalo continuo que se extiende desde las ondas de más baja frecuencia hasta las más altas; cada nombre descriptivo que se le atribuye a las partes que constituyen este espectro, está

relacionado con el proceso histórico de su descubrimiento y no a sus propiedades; ya que todas tienen la misma naturaleza física (Hewitt, 2002).

La radiación solar es un conjunto de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes (Jaramillo, 2005) de las cuales 99% se encuentran en un rango de $0.25 \mu\text{m} - 4.0 \mu\text{m}$; estos rangos corresponden al espectro que se extiende desde el ultravioleta al infrarrojo (Iqbal, 1983). Dentro de las longitudes de onda emitidas por el sol podemos encontrar lo que se conoce como el espectro visible; cuyos rangos van de 400 a 700 nm (Beléndez, 2015).

Como sabemos la radiación solar está compuesta de ondas electromagnéticas portadoras de energía que hacen oscilar a los átomos al tener contacto con la materia; la fuerza de esta oscilación son las causantes de que los objetos transmitan y absorban la luz, o en caso de materiales opacos que la reflejen (Hewitt, 2002). La radiación solar al estar en contacto con la materia puede sufrir cambios de dirección en su trayectoria conocidos como reflexión; en este cambio de dirección el tipo de ondas electromagnéticas que componen a la radiación reflejada tiende a ser modificadas por la materia, ya que una parte tiende a oscilar con los átomos provocando una resonancia causante de la absorción de ciertas longitudes de onda (Hewitt, 2002). En la absorción, las ondas electromagnéticas son detenidas por los átomos resonantes cediendo así su energía en forma de calor (Hewitt, 2002). Las ondas que se encuentran por encima o por debajo de la vibración de resonancia son las que se transmiten; y al igual que las ondas electromagnéticas reflejadas el tipo de ondas electromagnéticas que la componen cambia (Hewitt, 2002).

La emisión es otra de las propiedades de la luz. La reflexión, transmisión, y la absorción pueden ser descritas con la física clásica, no obstante, es totalmente ineficiente para explicar la emisión. Por otro lado, la emisión descrita bajo el contexto de la física cuántica presenta una explicación más coherente, aun así, es claro que la dificultad para entender la emisión no es su forma de estimarla o conceptualizarla, sino la asimilación del concepto de dualidad onda-partícula que posee la luz. La

emisión de luz está asociada con el cambio de estado de energía de los electrones (excitación), los electrones excitados tienden a elevarse a un estado de energía mayor, al regresar a su estado normal liberan un impulso palpitante de energía llamado fotón cuya frecuencia está relacionada con la transición de energía del salto (Hewitt, 2002). En resumen, podemos decir que la emisión se da cuando un electrón de un átomo da un salto cuántico, de un nivel de energía mayor a uno menor.

Estas propiedades de la luz están relacionadas directamente con la naturaleza de las ondas electromagnéticas; y debido a esto, la cantidad, calidad y dirección de la radiación solar de un cultivo puede ser modificada. Las plantas, al ser organismos que dependen de la luz, han desarrollado diferentes pigmentos vegetales sensibles a la cantidad de fotones, la composición espectral de las ondas electromagnéticas, el ángulo de incidencia y la duración del estímulo luminoso (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Estos pigmentos les permiten modificar su crecimiento y desarrollo en función de las condiciones de luz de un cultivo. Además, la radiación solar no solo proporciona la energía necesaria para sintetizar moléculas orgánicas, sino que también calienta las diferentes capas de la atmósfera, influye en los constantes cambios del estado del agua y mantiene en movimiento el aire (Maass, 2003).

Tener conocimiento pleno de la naturaleza de la luz nos permite explicar y calcular todos los fenómenos relacionados con ella; así como la influencia que tiene en los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas. De esta forma podemos conocer con una aceptable exactitud cuanta radiación solar incide en nuestro cultivo, que cantidad es transmitida y reflejada, cuanta radiación es absorbida por el cultivo y que ondas electromagnéticas son las que absorbe, incluso podemos estimar cuántos fotones son transformados en energía química.

4.2.2. Temperatura

La temperatura puede medirse de modo cualitativo basado en las sensaciones fisiológicas de nuestro cuerpo; pero la interpretación cognitiva basada en nuestra fisiología suele ser una herramienta inexacta para la estimación de la temperatura (Howell *et al.*, 1990). Sin embargo, la temperatura se define como una magnitud escalar que representa el promedio de energía cinética del estado de agitación de la materia; es decir, está asociada con el movimiento aleatorio las moléculas y átomos que componen la materia (Chang y Overby, 2000).

Con el paso del tiempo y gracias a que se descubrió como la temperatura afectaba las propiedades de manera repetible y predecible de ciertas materias, se pudo lograr construir instrumentos que midieran la temperatura de los cuerpos (Cengel *et al.*, 2003). Algunas de estas propiedades son la dilatación de un líquido (mercurio o alcohol) cuando la temperatura aumenta (Baehr *et al.*, 1965). Gracias a esto es común encontrar termómetros a base de mercurio o alcohol cuya función es expandirse a lo largo de un tubo de vidrio que es asociado a una escala térmica (Smith, 1997). Esto dio origen a la construcción de escalas térmicas; las cuales, consisten principalmente en asociar la expansión de un líquido en una columna de vidrio con los valores numéricos de una escala. La construcción suele ser un poco arbitraria ya que se eligen los puntos máximos y mínimos según la consideración del creador (Faires, 1965). Un buen ejemplo de esto es la escala llamada Celsius (o centígrada) y Fahrenheit, las cuales establece dos puntos fijos en función de la congelación y evaporación (Faires, 1965). Estas dos escalas son las más usadas en el sistema internacional de medidas, pero el uso de escalas independientes a las propiedades de cualquier sustancia o sustancias es más práctico para la mayoría de cálculos termodinámicos; esta fue desarrollada por Lord Kelvin (1824-1907) (Cengel, Boles *et al.*, 2003). Básicamente la concepción de esta escala está fundamentada en el concepto de cero absoluto, es decir, se puede deducir que solo se tiene que asignar un punto de referencia diferente a cero para establecer la pendiente de la escala lineal (Cengel *et al.*, 2003).

4.3. Principales procesos fisiológicos de las plantas

4.3.1. Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso complejo que permite a los organismos autótrofos formar sustancias orgánicas; ésto a partir de la transformación de la radiación electromagnética que captan (Richter, 1972). Este proceso fisiológico es la base de la vida, no solo de las plantas, sino de todos los organismos que cohabitan la biosfera terrestre. Conocer cómo se lleva a cabo el proceso de la transformación de la energía lumínica en energía química ha llevado largos años de estudio de muchos científicos (Richter, 1972).

La densidad de flujo de fotones fotosintéticos que incide en la superficie terrestre y que está disponible para las plantas en un día soleado puede llegar a ser $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o unos 434 W m^{-2} ; de esta cantidad de ondas electromagnéticas, las plantas tienen la capacidad de absolver longitudes de onda en un rango de 400 a 700 nm, a lo que denominamos la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Esta energía es absorbida por los pigmentos denominados clorofila a y clorofila b, ubicados en los cloroplastos de las plantas; sin embargo, existen otros pigmentos llamados carotenoides que también influyen en la captación y transformación de la luz (Taiz y Zeiger, 2010). La absorción de la radiación solar se inicia en lo que se conoce como complejos pigmento-proteína o regularmente llamadas antena, los cuales canalizan la energía captada hacia los centros de reacción de los fotosistemas; donde posteriormente se convierten en un flujo de electrones y protones con la finalidad de generar moléculas óxido-reductoras (Azcón-Bieto y Talón, 2008). A nivel molecular un fotón es absorbido por una molécula que se eleva a un estado mayor de energía (estado excitado) provocando una inestabilidad, esta inestabilidad provoca que se transfiera la energía a otra molécula adyacente, que se le conoce como transferencia-exitancia, que es la base del funcionamiento del complejo antena. Los complejos antenas son complejos

estructurales separados y que se acoplan individualmente a los fotosistemas (fotosistema I y fotosistema II) los cuales funcionan como trampas de luz para la conversión de energía excitónica a energía electroquímica redox. Dentro de los fotosistemas se encuentran elementos aceptores y donadores de electrones que están conectados en cadena; estos componentes tienden a observarse mejor en el esquema Z, y nos da una idea más clara de cómo los fotosistemas funcionan en lo que se conoce como la cadena de transporte electrónico fotosintético (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

La segunda fase de la fotosíntesis es la que realmente tiene la capacidad de fijar el CO₂ en las primeras moléculas orgánicas; en este proceso intervienen una encima conocida como rubisco (ribulosa 1, 5 difosfato carboxilasa-oxigenasa) ubicada en el estroma del cloroplasto (Darnell *et al.*, 1986). En estas reacciones encargadas de fijar el CO₂ se utilizan el ATP y el NADPH (producidos en la fase dependiente de la luz) como la fuente de energía para llevar a cabo el proceso y el poder reductor respectivamente (Alberts *et al.*, 2010). Todo este proceso se conoce como el ciclo de Calvin, el cual toma el nombre de su descubridor Melvin Calvin (1911-1997) (Curtis y Schnek, 2008). El proceso comienza con la combinación de 6 ribulosas 1, 5 difosfato con 6 moléculas de CO₂ para producir 12 moléculas de 3-fosfoglicerato (De Robertis *et al.*, 1982). Las 12 moléculas de 3-fosfoglicerato (12 triosas) se combinan con ATP bajo un proceso denominado fosforilación el cual da como resultado 12 moléculas de 1, 3-difosfoglicerato (De Robertis *et al.*, 1982). Cada molécula pierde un fosforo y puede aceptar un H⁺ y e⁻ del NADPH, dando paso a su transformación en moléculas llamadas 3-fosfogliceraldehído (De Robertis *et al.*, 1982). De las 12 moléculas de 3-fosfogliceraldehído 2 dejan el ciclo para ser la materia prima precursora de monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos que se utilizan en la célula; por otro lado, las 10 moléculas restantes de 3-fosfogliceraldehído son reducidas a 6 moléculas de ribulosa 1, 5-difosfato, que posteriormente inician el ciclo de Calvin (De Robertis *et al.*, 1982).

4.3.2. Respiración

Las células vegetales necesitan energía para poder realizar todas sus actividades fisiológicas; esta es tomada a partir de la molécula de ATP, la cual es capaz de contener energía fácilmente disponible para todos los procesos metabólicos que se sitúan en el interior de la célula (De Robertis *et al.*, 1982). La molécula de ATP posee uniones de alta energía ubicada entre sus fosfatos, pero el enlace que suele usarse es el terminal. Dentro de la célula vegetal se pueden generar moléculas de ATP en el cloroplasto, mitocondria y el citoplasma, no obstante, la principal fuente de energía (moléculas de ATP) se generan en la mitocondria (De Robertis *et al.*, 1982).

La capacidad que tienen las células de transformar moléculas orgánicas complejas en otras más sencillas, y la habilidad para generar energía útil para los procesos metabólicos se le conoce como catabolismo (Rosenda, 1997). Este proceso tiene como fin la degradación de hidratos de carbono y comúnmente le llamamos respiración celular, el cual está compuesto de dos etapas, la glucólisis o glicólisis y la respiración, que a su vez consiste en dos etapas, el ciclo de Krebs y el transporte de electrones (Curtis y Schnek, 2008). A grandes rasgos tanto en la glucólisis como en el ciclo de Krebs se lleva a cabo una separación de los átomos de hidrógenos de la cadena carbonatada de la molécula de glucosa, las cuales son cedidas a dos coenzimas que también fungen como transportadoras de electrones, la NAD y el FAD; las cuales al reducirse se generan el NADH y el FADH₂ ceden sus electrones en la cadena respiratoria para producir ATP (Curtis y Schnek, 2008).

4.4. Influencia de la radiación solar y temperatura en el crecimiento y desarrollo de las plantas

Las plantas cultivadas por el hombre pueden recibir diferentes cantidades de radiación solar según las características de su ambiente. Estos organismos autótrofos presentan diferentes patrones de crecimiento y desarrollo según se

encuentren expuestos a diferentes cantidades de radiación solar; algunas de estas respuestas son el resultado adaptativo a condiciones de luz o sombra, cuyo objetivo principal es el mejoramiento de la eficiencia fotosintética (Bidwell, 1979). La radiación solar influye en procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la transpiración; también es la responsable de los cambios morfológicos que dan lugar a diferentes estados de desarrollo como la iniciación floral (en algunas especies), y tiene influencia directa en el crecimiento ya que es la responsable de comportamientos como el tropismo (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

La radiación solar está vinculada íntimamente con la temperatura; pero esta última puede variar debido a las condiciones geográficas de cada localidad. Al igual que la radiación, la temperatura tiene influencia en muchos de los procesos fisiológicos de las plantas; ya que influye directamente en la velocidad de las reacciones químicas catalizadas enzimáticamente, la actividad de las macromoléculas y el estado físico en el que se encuentre el agua (Azcón-Bieto y Talón, 2008). De igual forma la respiración, la fotosíntesis, la asimilación de CO₂ y el desarrollo se ven afectados por los cambios de temperatura (Bidwell, 1979). Debido a la relación íntima entre radiación solar y temperatura, no es raro que los procesos como respiración, fotosíntesis, y asimilación de CO₂ se vean afectados por estas dos variables.

La fotosíntesis es un proceso que depende íntimamente de factores ambientales como la luz, la temperatura y el CO₂; debido a esto es de esperarse que presente una modificación en su eficiencia al variar alguno de estos parámetros. Cabe mencionar que también las interacciones entre los factores ambientales desencadenan comportamientos en la eficiencia de la fotosíntesis; esto quedó comprobado por el fisiólogo inglés F. Blackman en 1905, quien realizó un experimento variando la radiación y la temperatura. Blackman (1905) reporta que, a intensidades altas de luz, la eficiencia de la fotosíntesis cambia en función de la temperatura, pero a bajas intensidades de luz la temperatura era poco influyente en esta tasa fotosintética. Subsecuentemente se realizaron experimentos arrojando

como resultado que la porción de la fotosíntesis que es sensible a la temperatura también puede limitarse reduciendo el CO_2 (Bidwell, 1979). Aunque muchos de estos experimentos dieron como resultado el descubrimiento de las dos fases de la fotosíntesis; gracias a ellos se ha adquirido una visión más clara de cómo las interacciones de los factores ambientales pueden generar variaciones específicas en la eficiencia de la fotosíntesis en las plantas.

En cuanto a la respuesta de la fotosíntesis a la luz en hojas, podemos identificar diferentes comportamientos en función de la radiación en la banda fotosintética. A grandes rasgos, la función que corresponde a la respuesta de la tasa de la fotosíntesis es en algunos casos muy similar a una ecuación logarítmica que puede o no presentar una asíntota en la parte superior. Lo que sí es importante mencionar es que ciertas partes de la curva corresponden a comportamiento fotosintéticos de la hoja.

Dentro de estos comportamientos podemos encontrar lo que se denomina como punto de compensación de luz; que es la mínima cantidad de flujo fotónico en donde la ganancia de CO_2 por la planta compensa el CO_2 de respiración, es decir están en equilibrio (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Por debajo de este punto de compensación la planta presenta solo pérdidas por respiración. Al aumentar el flujo de fotones por encima del punto de compensación se presenta un aumento proporcional en la cantidad de CO_2 asimilado, dando como resultado una relación lineal, cuya pendiente es conocida como la eficiencia fotosintética en función de los fotones absorbidos (Taiz y Zeiger, 2010). El punto máximo de la curva es conocido como el punto de saturación luminosa, este punto puede usarse como una referencia para identificar plantas C_3 o C_4 ya que la estabilización de un punto máximo es característico de una C_3 mientras que una C_4 no llega a presentar esta una saturación (Azcón-Bieto y Talón, 2008). Dentro del comportamiento de la tasa fotosintética podemos identificar dos situaciones ambientales; la primera hace referencia a la limitación de la asimilación de CO_2 en función de la radiación

fotosintética (parte linear) y la otra parte corresponde a limitación de parte bioquímica de la fotosíntesis (ciclo de Calvin) (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Por otro lado, la temperatura afecta todo el proceso biológico y esta se encuentra muy ligada a la fotosíntesis; principalmente en la fase del ciclo de Calvin (Bidwell, 1979). Esto se debe a que la activación de la Rubisco decrece a altas temperaturas en muchas especies de planta (Salvucci, 2004). Berry y Bjorkman (1980) describen a la fotosíntesis en función de la temperatura como una ecuación parabólica; donde existe un máximo de asimilación de CO₂ en la parte más alta de la curva y un decremento en los máximos y mínimos de temperatura. Cabe mencionar que la función parabólica no presenta una curva simétrica la mayor parte de las veces.

En temperaturas altas la membrana tilacoidal presenta una pérdida de protones, lo que significa en gran medida una deficiencia en la producción de ATP (Havaux, 1996). Otro proceso enzimático que se ve afectado por el aumento de temperatura es la afinidad de la Rubisco por el oxígeno en relación al CO₂; al decrecer la solubilidad del CO₂ en el medio acuoso se favorece a la fotorrespiración.

En presencia de bajas temperaturas también afecta el comportamiento de la membrana tilacoidal; esto da como resultado una alteración en la composición de ácidos grasos de la membrana ajustando su fluidez y la estabilización de las proteínas (Falcone *et al.*, 2004). Además, se generan mayores cantidades de Rubisco, sedoheptulosa-1,7-bisfosfatasa (SBPase) y fructosa-1,6-bisfosfatasa (Holaday *et al.*, 1992).

El comportamiento de las plantas que crecen en climas cálidos y fríos son diferentes. Las diferentes adaptaciones fisiológicas para poder llevar a cabo su ciclo de vida pueden ir desde tener mayor tolerancia en las membranas de los tilacoides (temperaturas altas), hasta a producir mayores cantidades de enzimas fotosintéticas (temperaturas bajas) (Yamori *et al.*, 2014).

Existen otros factores que afectan a la fotosíntesis; el déficit de agua, la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, las infecciones por hongos y otros patógenos, la contaminación y la precedencia de metales pesados en el suelo, pero, sin duda, el estrés hídrico es el factor limitante más importante. Sin embargo, como lo menciona Bidwell (1979), la fotosíntesis no es un proceso simple que actúa de manera lineal en función de una sola variable, sino que es un proceso uniforme que se compone de un complejo de reacciones fotoquímicas (dependientes de la luz) y bioquímicas o enzimáticas (que dependen de la temperatura y CO₂ atmosférico).

4.5. Modelación

4.5.1. Importancia de la modelación

La agricultura siempre ha jugado un papel importante en la evolución humana, esta constituye una herencia del hombre primitivo, y sin duda, gracias a esta práctica se dio el desarrollo de la humanidad (Krapovickas, 2010). Actualmente, la agricultura se ha ido tecnificando y ha logrado incorporar diferentes ramas de la ciencia como la Estadística, la Biología, la Bioquímica, la Informática, etc. Estas disciplinas que hacen grandes aportes a la producción; permiten que nuestros sistemas agrícolas puedan obtener el rendimiento necesario para sustentar la demanda de alimento de nuestro planeta.

La actividad agrícola actual requiere tener en cuenta, factores edafoclimáticos, necesidades hídricas, mejoramiento genético, fertilización, control de plagas y todo lo que tenga influencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Para llevar a cabo un buen manejo agrícola donde podamos tener la certeza de que estamos tomando decisiones asertivas; sin duda, tenemos que tener un amplio conocimiento sobre nuestro agroecosistema, y en este sentido los modelos de predicción son una herramienta útil.

La creación de modelos de simulación en la agricultura ha crecido en los últimos años (Salazar, 2006), ya que nos permite no solo tomar buenas decisiones, sino que también nos permite poder probar hipótesis, describir y entender sistemas que poseen un amplio grado de dificultad y además poder generar diferentes escenarios de predicción (Lentz, 1998). Los avances tecnológicos en electrónica e informática que se adaptan para uso agrícola, han llevado a la modelación al alcance prácticamente de todos, permitiendo el rápido manejo de grandes cantidades de datos, la monitorización en tiempo real, y la programación de rutinas capaces de calcular muchas variables en cuestión de segundos.

La evolución de los modelos de simulación ha ido de la mano con la Informática, los nuevos descubrimientos en Fisiología Vegetal y algunas otras tecnologías que se fueron incorporando con el tiempo. Históricamente hemos pasado de pequeños sistemas con pocas variables y parámetros a sistemas complejos. No obstante, no debemos perder de vista que los modelos de simulación son representaciones de las partes de un sistema complejo, y que su uso y aplicación puede estar limitado por el conocimiento que tengamos sobre dicho sistema.

Aunque los modelos de simulación no representan fielmente la realidad que intentamos abstraer, sean difíciles de construir, tienden a ser aplicables solo a situaciones para las que fueron creadas y algunas veces presenten errores. La modelación nos ayuda a tratar de entender y darle coherencia a nuestros objetos de estudio y mejorar el manejo agrícola; pero lo más importante radica en la constante búsqueda del conocimiento y su interpretación matemática del mismo.

4.5.2. Historia de los modelos

Los modelos de predicción en el campo de la agricultura tuvieron su origen en la década de 1960 en la Universidad de Wageningen, esto gracias al trabajo de C.T de Wit quien planteaba que los sistemas agrícolas podían modelarse a partir del uso de principios físicos y biológicos (Jones *et al.*, 2016). W. G. Duncan fue otro de los

pioneros en la rama del modelaje agrícola; su trabajo sobre modelado de la fotosíntesis de un dosel, ha sido un trabajo, muy usado en la modelación de cultivos (Jones *et al.*, 2016).

Hoy en día existen diversas instituciones que se dedican al desarrollo de modelos de simulación en la agricultura y cada una de ellas presenta su propia propuesta; algunas de las más importantes son: el IBSNAT (International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) en los Estados Unidos, APSIM (Agricultural Production system SIMulator) en Australia, y la Universidad de Wageningen (Bouman *et al.*, 1996).

Jones *et al.*, (2016) mencionan que en Estados Unidos, tanto los trabajos de Duncan, de Wit, Bouman y Rabbinge fueron causa de intriga entre la comunidad científica de la época, lo que originó que los primeros modelos fueran realizados por curiosidad, no obstante, los científicos agrícolas aún eran muy escépticos. Pero la perspectiva estadounidense cambio al ver que la Unión Soviética aumentaba las compras de trigo causando un alza en su precio; lo que dio como resultado un gran impulso a esta rama de la agricultura (Pinter *et al.*, 2003). A partir de esto empezaron a construirse modelos como el CERES-wheat y el CERES-maize (Ritchie, 1985). Del otro lado del mundo en la Universidad de Wageningen, también se estaban realizando trabajos importantes sobre modelación de capos agrícolas, mucho de este trabajo derivado de las aportaciones de C.T de Wit. Algunos modelos importantes de esta universidad son: ARID CROP, PAPRAN, SWHEAT, SUCROS y WOFOS, entre otros.

Conforme avanzó el tiempo los modelos de simulación agrícola fueron incluyendo factores como las plagas y enfermedades, hasta la actualidad que logran modelar sistemas de genética molecular; sin embargo, estos avances en la modelación fueron lentos y sabemos que hay mucho trabajo detrás de ellos (Jones *et al.*, 2016), pero, sin duda la modelación ha encontrado su espacio en la producción agrícola.

4.5.3. ¿Qué es un modelo?

Los modelos pueden venir en muchas formas, pero en esencia podríamos describirlos como la formulación de una “imagen” sobre el funcionamiento de un sistema (Soltani, 2012). Aunque esta analogía describe de manera breve que es un modelo, se adapta bien a un primer acercamiento. Según Hernández *et al.* (2009) un modelo se puede concebir como un bosquejo capaz de representar con cierto grado de precisión y de la forma más completa posible la realidad que se pretende abstraer. Concretamente, los modelos son una representación simplificada de un sistema bien delimitado que pertenece al mundo real (Hernández *et al.*, 2009). El objetivo principal de la modelación es lograr una simulación que opere y replique nuestro sistema lo más parecido al mundo real (Salazar, 2006).

Los modelos pueden ser agrupados en: conceptual o verbal, los esquemáticos o tipo diagrama, los modelos físicos y los matemáticos (Haefner, 2012). Los modelos matemáticos se pueden clasificar en dos grandes grupos; por un lado, los empíricos, estadístico o como comúnmente los llaman, “de caja negra”, y por otro lado los modelos explicativos, cuya construcción se realiza con la descripción cuantitativa de los mecanismos y procesos que afectan un sistema (Vries, 1989). Thornley y Johnson (1990) amplían un poco la clasificación hecha por Vries (1989), agrupando a los modelos matemáticos en tres tipos; modelos empíricos, modelos mecanicistas y modelos teleonómicos. Los modelos empíricos tienden a ser descripciones provenientes de datos y proporcionan relaciones fácilmente observables en los sistemas. Sin embargo, no proporcionan ninguna explicación sobre el comportamiento del sistema, no obstante, no quiere decir que sean deficientes, su uso está muy ligado al resumen y descubrimiento, entre estos se encuentran los modelos de regresión simple, regresión múltiple y redes neuronales (López-Cruz *et al.*, 2005). Los modelos teleonómicos son usados en la predicción de comportamientos dirigidos por metas, y se formula a través de objetivos (López-Cruz *et al.*, 2005; Rojas-Lara *et al.*, 2008). Por último, están los modelos explicativos o mecanicistas, cuya construcción está basada en un enfoque determinístico

(Thornley y Johnson, 1990). Los modelos mecanicistas son una herramienta muy poderosa para la construcción del conocimiento, ya que estos tienen la capacidad de expresar hipótesis con mayor facilidad usando siempre un enfoque matemático y brindan una explicación cuantitativa de los procesos que están involucrados en el sistema; por lo regular estos modelos están definidos por ecuaciones diferenciales no-lineales, las cuales pueden describir el comportamiento de las variables estado de un sistema (López-Cruz *et al.*, 2005).

En cuanto a la agricultura, los modelos de simulación de crecimiento de un cultivo, requiere de la definición matemática de los diferentes procesos fisiológicos que se llevan a cabo durante el crecimiento y desarrollo, tales como la producción de materia seca, su distribución, fotosíntesis, respiración, etc. (Enriquez-Reyes *et al.*, 2003). Los modelos de predicción en la agricultura no solo se mantienen en el rubro de la construcción del conocimiento, sino que pueden ser utilizados como una fuente sólida de información acerca del posible estado de nuestro cultivo, el control del clima en un invernadero, nos ayudan a tomar decisiones en el específicas en el manejo como: la fertilización, riego, plagas y enfermedades (Lentz, 1998).

4.5.4. Modelo de predicción para tomate

Los modelos de predicción usados para la producción de tomate tienen su origen en los primeros trabajos que relacionan al crecimiento y desarrollo con factores climáticos (temperatura y radiación) bajo condiciones controladas y de campo. Trabajos como los de Went (1944b) relacionados con la termoperiodicidad en el crecimiento y fructificación del tomate, la correlación entre varios procesos fisiológicos y el crecimiento del tomate (Went, 1944a), la relación entre edad, luz, variedad y termoperiodicidad en tomate (Went, 1945), el efecto de la temperatura y la intensidad de la luz sobre el crecimiento de la parte aérea y primordios foliares (Hussey, 1963), el efecto de la temperatura nocturna y diurna sobre el crecimiento vegetativo (Hussey, 1965); fueron aportando variables y parámetros, (fisiológicos y climáticos) relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas. Esto dio

origen a los primeros modelos estocásticos que describían el comportamiento de variables de crecimiento (largo y ancho de tallo, área foliar, largo de raíces y acumulación de biomasa total y por órganos) en función de factores climáticos.

Con el nacimiento y validación de los modelos de predicción SUCROS87 y su predecesor BACROS para diferentes cultivos a campo abierto; Heuvelink (1995a) presenta TOMSIM (1.0), como un modelo exploratorio el cual es capaz de simular el crecimiento y desarrollo. TOMSIM (1.0) es un modelo de predicción para biomasa basado en SUKAM, el cual es un modelo usado bajo condiciones de invernadero y que también es basado en SUCROS87 y BACROS (Heuvelink, 1995a).

TOMSIM toma en cuenta tanto la radiación solar exterior como la transmitida por el plástico al interior del invernadero; la intercepción de radiación solar por parte del dosel es determinada principalmente por el índice de área foliar; no obstante, el crecimiento es determinado por la capacidad fotosintética de la hoja (Heuvelink, 1996). TOMSIM incluye la influencia del enriquecimiento de CO₂ y su influencia en la eficiencia de la fotosíntesis (Heuvelink, 1996). Además, incluye dos componentes de respiración muy importantes: la respiración de mantenimiento y la respiración de crecimiento; el primer componente está relacionado con el gasto de energía que es utilizado por la planta para el mantenimiento de la biomasa existente, así como el mantenimiento de los gradientes iónicos de las membranas celulares; y el segundo permite calcular la energía utilizada para la síntesis de nueva biomasa (Heuvelink, 1996). Posteriormente, TOMSIM hace el cálculo de repartición de biomasa, ya que es un balance importante para conocer la producción vegetativa o reproductiva; esto es importante porque afecta la calidad de la producción, así como la generación de nuevo dosel, el cual es necesario para la producción de asimilados (Heuvelink, 1996).

Otro modelo importante para la producción de tomate bajo invernadero es TOMGRO. Al igual que TOMSIM, TOMGRO también está diseñado para responder a los cambios de temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ en el interior

del invernadero. A diferencia de TOMSIM, TOMGRO está compuesto por variables estado en función de los componentes de desarrollo como; número de hojas, tallos, frutos, biomasa en las hojas, peciolos, tallos y fruto, así como el área de las hojas (Jones *et al.*, 1991). Este modelo de predicción tiene la capacidad de ser tanto esquemático como modular, permitiendo una fácil adaptación para situaciones más específicas como el crecimiento de órganos (López-Cruz *et al.*, 2005).

4.6. Conclusiones de revisión de literatura

La producción de tomate en invernadero es una actividad económica muy importante en el mundo. Con el paso del tiempo y la gran cantidad de descubrimientos científicos en fisiología de plantas, se ha logrado entender como la fotosíntesis, respiración y otros procesos fisiológicos son fundamentales para entender el crecimiento y desarrollo de las plantas. Con la incorporación de otras ciencias como física, química, informática y la electrónica en la investigación y producción agrícola; se ha podido lograr la abstracción de algunas partes que componen a un sistema agrícola.

A partir de trabajos realizados en la universidad de Wageningen y otras instituciones dedicadas a la investigación agrícola se han podido establecer modelos de predicción. Los modelos de predicción nos permiten desglosar un sistema en algunas de sus partes para lograr un mejor entendimiento de estos, nos ayuda a tomar mejores decisiones en cuanto al manejo del cultivo y puede llegar a generar nueva información acerca del sistema. En este sentido, un modelo de predicción agrícola es una herramienta en constante evolución capaz de ser ajustada y adaptada en función del conocimiento que se tenga de dicho sistema.

En cuanto a la producción de tomate en invernadero existen modelos como el TOMGRO, TOMSIM y TOMPOSSE; los cuales presentan diferentes formas de evaluar y predecir el crecimiento y desarrollo en tomate. Cada modelo está basado

en trabajos de investigación tanto en campo como en ambientes controlados y estos pretenden brindar una visión específica del sistema que representan.

Los modelos de predicción en el campo de la agricultura son de gran importancia para mejorar la producción bajo invernadero y la aportación de nuevo conocimiento científico, su precisión ha ido de la mano con la evolución e incorporación e otras disciplinas y sin duda es un campo integrador del conocimiento de un sistema.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Sitio experimental

La investigación se llevó a cabo en el campo experimental del Campus Montecillo, del Colegio de Postgraduados (COLPOS), a 19° 52´ latitud norte y 98° 88´, longitud oeste y a 2,250 metros sobre el nivel del mar. El clima de la región es un clima templado subúmido (C (w₀)(w)b(i) g) (García, 2004), con una temperatura promedio anual de 16.4 °C (CONAGUA, 2018).

5.2. Material genético

Se usó el híbrido comercial de tomate tipo saladette DRD 8551 de la compañía SEMINIS®; ya que es una de las variedades de mayor uso e importancia económica en la región noroeste del país. Este híbrido tiene crecimiento semi-determinado, de vigor muy alto, con resistencia alta a ToMV:0-2 (virus del mosaico del tabaco) /ToTV (virus del torrado del tomate)/Fol:0,1 (Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici, razas 0 y 1) /Va:0 (Verticilium albo-atrum)/Vd:0 (Verticilium dahliae), y resistencia intermedia a TYLCV (Tomato Yellow Leaf Curl Virus (virus del rizado amarillo del tomate) /Ma (Meloidogyne arenaria)/Mi (Meloidogyne. incognita)/Mj (Meloidogyne. Javanica). Produce frutos grandes (130 a 160 g/fruto) con forma ligeramente cuadrada, de color rojo, dulces y con altos grados brix, destinados principalmente para venta en fresco y con 15 d de vida de anaquel. El rendimiento promedio de fruto de este híbrido es de 30 t ha⁻¹

5.3. Construcción de microtúneles

Para establecer el experimento se construyeron 3 estructuras protegidas con forma de microtúneles. A cada microtúnel se le adaptó un ventilador como extractor de aire, un calefactor, una estructura de madera para evitar que las charolas de poliestireno estuvieran en contacto con el suelo, malla para cubrir el suelo de color blanco (ground cover) y plástico lechoso de 50 % de transmisión de radiación solar, el cual fue designado para cubrir las estructuras de invernaderos. Las dimensiones de cada microtúnel se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Dimensiones de cada microtúnel.

Microtúnel	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)
1	3.0	1.5	1.9
2	4.0	1.5	1.9
3	3.0	1.5	1.3

5.4. Control de la temperatura del aire al interior de los microtúneles

5.4.1. Temperatura del aire al interior de los microtúneles

Se ajustó el patrón de la temperatura del aire (T_a) en cada microtúnel, lo más cercano posible a funciones senoidales dependientes de la hora del día (Cuadro 4). Las funciones fueron:

$$T_{ac} = 10.6 \text{ seno}(0.28h - 40.45) + 16.5 \text{ para el rango de } 6 \text{ a } 27 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{ac} = 14.8 \text{ seno}(0.28h - 40.45) + 20.5 \text{ para el rango de } 6 \text{ a } 35 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{ac} = 17.5 \text{ seno}(0.28h - 40.45) + 23 \text{ para el rango de } 6 \text{ a } 40 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

donde: T_{ac} es la temperatura del aire control dentro del microtúnel ($^\circ\text{C}$) y h es la hora del día (0 a 23 h).

Cuadro 4. Patrones de temperatura de aire controlada (T_{ac}) por hora (h) en el rango de 6 a 27 °C (Microtúnel 1), 6 a 35 °C (Microtúnel 2) y 6 a 40 °C (Microtúnel 3).

Temperaturas control mín-máx (°C)			
Hora	6-27	6-35	6-40
0	11	13	14
1	8	10	10
2	7	7	8
3	6	6	6
4	6	6	6
5	6	6	6
6	7	8	9
7	9	11	12
8	12	14	16
9	15	18	21
10	18	22	25
11	21	26	30
12	23	30	34
13	25	33	37
14	27	35	39
15	27	35	40
16	27	35	40
17	26	34	39
18	24	32	36
19	22	28	32
20	19	25	28
21	16	21	23
22	14	17	18
23	11	13	14

Cada valor de x corresponde a una hora (h) del día que es reemplazado en cada función de ajuste senoidal por microtúnel. $f(x) = 14.8 * \text{SENO} ((0.28 * x) - 40.45) + 20.5$ corresponde al microtúnel 1, $f(x) = 17.5 * \text{SENO} ((0.28 * x) - 40.45) + 23$ corresponde al microtúnel 2 y $f(x) = 10.6 * \text{SENO} ((0.28 * x) - 40.45) + 16.5$.

5.4.2. Sistema de control

Para ajustar T_a a la curva de la función de T_{ac} , se desarrolló un sistema de control (*SC*). El *SC* se diseñó a partir hardware y software “open source”. El hardware del *SC* consistió de cinco componentes: a) Dispositivo central de control (*DCC*), b) Dispositivos de entrada (*DE*), c) Dispositivos de salida (*DS*), d) Dispositivo de comunicación (*DC*) y e) Sistema de monitoreo (*SM*). El software usado fue el compilador Arduino®.

5.4.3. Construcción del dispositivo central de control

Para la construcción del *DCC* se dispuso de la plataforma Arduino® como centro de procesamiento, control y comunicación.

Como *DCC*, se usó una placa Arduino MEGA®, basada en el microcontrolador ATmega1280 de la compañía ATMEL CORPORATION®. Esta placa Arduino® provee un total de 54 pines digitales que son usados como entrada o salida, además, tiene la posibilidad de asignar 16 de estos 54 pines como entradas y salidas analógicas.

5.4.4. Dispositivos de entrada

Se usó un sensor digital de humedad relativa (%) y temperatura del aire (°C) modelo DHT22 para monitorear el estado climatológico de cada microtúnel. El sensor digital DHT22 opera bajo el rango de 0 a 100 % de humedad relativa (*HR*) y de 40 a 80 °C. La resolución para calcular la *HR* fue de 0.1 % y para la temperatura fue 0.1 °C, mientras que la exactitud fue de ± 2 % para *HR* y de menos de ± 0.5 °C para la temperatura del aire.

Para registrar la fecha y hora de las lecturas en el microcontrolador, se usó un módulo *RTC* basado en el chip DS3231 del fabricante DALLAS SEMICONDUCTOR®.

5.4.5. Dispositivos de salida

Como dispositivo de salida se usó un módulo genérico de 8 canales para controlar relevadores de 5 V y 10 A. Dicho modulo se usó como como interruptor para los extractores y calefactores de cada microtúnel.

5.4.6. Dispositivo de comunicación

Como interfaz de comunicación, se usó una placa ethernet genérica basada en el chip W5100 fabricada por la compañía Wiznet®. Esta interfaz de comunicación soporta los protocolos de comunicación: protocolo de internet (internet protocol o *IP*), protocolo de control de transmisión (Transmission Control Protocol o *TCP*) y el protocolo de datagramas de usuario (User Datagram Protocol o *UDP*).

5.4.7. Sistema de monitoreo

Para construir el sistema de monitoreo (*SM*) en tiempo real del DCC, se usó el servidor “Internet of Things” (*IOT*) que presta la compañía Ubidots®. Este servicio permite enlazar el *SCC* con el servidor IOT para almacenar datos, enviar alertas a dispositivos móviles como pueden ser los teléfonos celulares inteligentes, además de enviar y recibir instrucciones del *SCC*.

5.4.8. Funcionamiento del sistema de control

El *SC* recibe información a partir de un sensor de humedad relativa y temperatura del aire a nivel de las plantas registrando la T_a cada 5 s y envía el registro al dispositivo central de control (*DCC*), que compara con la T_{ac} . Si $T_a - T_{ac} \geq 0.5$ °C

entonces el *DCC* activa el extractor de aire para bajar T_a . T_a disminuye y cuando $T_a - T_{ac} = 0$ se apaga el extractor. Cuando $T_a - T_{ac} \leq -0.5$ °C entonces el *DCC* activa el calefactor para aumentar T_a hasta que $T_a - T_{ac} = 0$, y el *DCC* apaga el calefactor. Una descripción más detallada sobre el funcionamiento del SC se encuentra en el código escrito para el compilador Aduino® y además se incluye la fotografía del circuito eléctrico establecido en campo (ANEXO).

5.5. Tratamientos

Para llevar a cabo el experimento se definieron tres tratamientos. Cada tratamiento corresponde a un rango particular de T_a máxima y mínima. Una descripción más detallada se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Descripción de tratamientos.

Microtúnel	1	2	3
Tratamiento	$T2$	$T3$	$T1$
$T_{mín} - T_{máx}$, °C	6-35	6-40	6-27

donde: $T_{mín}$ la temperatura mínima y $T_{máx}$ la temperatura máxima programada para cada microtúnel en °C.

5.6. Fase experimental

5.6.1. Fecha de siembra, método de siembra y labores culturales

La fase experimental inició el 26 de junio del 2017 y finalizó el 07 de septiembre del 2017. Dicha fase se dividió en dos experimentos; el primero del 26 de junio del 2017 al 16 de julio del 2017 ($F1$) y el segundo del 17 de agosto del 2017 al 06 de septiembre del 2017 ($F2$).

Se establecieron 3 ambientes controlados por cada fecha de cultivo. En total se establecieron 6 tratamientos; 3 para F1 y 3 más para F2. Las características de cada ambiente por fecha de cultivo se describen en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Definición de tratamientos por fecha de cultivo.

Fecha de cultivo	Temperatura del aire $T_{min} - T_{max}$ (°C)		
	$T1$	$T2$	$T3$
$F1$	6-27	6-35	6-40
$F2$	6-27	6-35	6-40

donde: $T1$, $T2$ y $T3$ son los tratamientos y $F1$ y $F2$ son las fechas de cultivo.

Las semillas se sembraron en charolas de poliestireno expandido (*EPS*) de 66.6 cm de largo, 34.2 cm de ancho y 7 cm de altura, y con 200 cavidades de 2.5 cm de largo, 2.5 cm de ancho y 6.8 cm de altura. Las charolas fueron previamente desinfectadas con una solución de hipoclorito de sodio al 2 % por 1 h, para entonces lavar con detergente en polvo y agua, y finalmente se secaron al sol.

El sustrato usado fue turba “mezcla fina especial” de la marca SUNSHINE®, diseñada para la producción de plántulas en invernadero. El sustrato fue vaciado en una carretilla y humedecido poco a poco con agua hasta lograr una mezcla homogénea que al ser presionada en la palma de la mano dicha mezcla se compactará sin escurrir el agua, técnica de campo para determinar la capacidad de campo. Se llenaron las charolas a mano con este sustrato y se homogenizó la profundidad de siembra con un rodillo para charolas. En cada cavidad se depositó una semilla que subsecuentemente fue cubierta con una capa de turba. Al finalizar la siembra, las charolas fueron regadas con agua, estibadas dentro de un invernadero, y cubiertas con plástico negro. Las charolas se descubrieron y colocaron individualmente dentro del invernadero a los 5 días cuando inició la emergencia de las plántulas. Las charolas se colocaron sobre una base de madera dentro de cada túnel cubierto con plástico lechoso de 50 % de transmisión de la radiación solar entre los 11 y 14 días ($F1$ y $F2$ respectivamente) después de la

siembra (*dds*) cuando el 50 % de las plántulas tenían cotiledones completamente desplegados.

Las plántulas se regaron con agua simple durante la emergencia hasta la primera etapa fenológica (50 % de plántulas con cotiledones completamente extendidos). Posteriormente, se usó fertirriego una vez al día a partir de los 20 días después del establecimiento de las plántulas en su respectivo ambiente (*dde*), se aplicaron dos riegos por día con el fertilizante Ultrasol® Inicial (NPK) 15-30-15 de la marca SQM®, adicionado con 1 % S, 1 % MgO más otros micronutrientes, a la dosis de 0.5 g L⁻¹ durante la primera semana, con aumentos de 0.125 g L⁻¹ por semana, de acuerdo con la recomendación del fabricante para el cultivo de plántulas de tomate.

5.7. Variables y parámetros determinados

5.7.1. Variables climáticas

5.7.1.1 Registros de datos de la estación meteorológica

Se obtuvieron registros de la irradiancia solar instantánea ($I_i, J m^{-2} s^{-1}$) de la estación meteorológica ubicada en el Colegio de Postgraduados a 19° 29' latitud norte y 98° 54' longitud oeste, a 2250 m sobre el nivel del mar. Dicha estación se encuentra a 500 m del sitio experimental.

5.7.1.2. Irradiancia solar diaria

La irradiancia solar instantánea ($I_i, J m^{-2} s^{-1}$) obtenida cada 5 min de la estación meteorológica institucional se integró por día con el programa Curve Expert® para poder calcular la variable de Irradiancia solar diaria ($I_d, MJ m^{-2} d^{-1}$)

5.7.1.3. Temperatura del aire

Se registró la temperatura del aire dentro de cada túnel (T_a , °C) con el sensor integrado en el *SC* para monitorear esta variable en tiempo real. Además, se usaron registradores electrónicos de temperatura del aire de la marca Hobo modelo U12-013.

5.7.1.4. Transmisión de la cubierta plástica de los microtúneles

Para calcular el porcentaje de transmisión del plástico (Tr_p , %) de los microtúneles, se hicieron 4 mediciones al interior y 4 mediciones al exterior de cada microtúnel de la densidad de flujo de fotones fotosintéticos ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con un radiómetro lineal LI-1500 (LI-COR®, Inc.). Las mediciones se realizaron a la 13:00 h bajo condiciones despejadas. Después, con base en la relación entre la densidad de flujo de fotones fotosintéticos medidos fuera y dentro del microtúnel, se calculó el porcentaje de transmisión de la cubierta plástica.

5.7.2. Variables fenológicas

Para llevar a cabo la evaluación del desarrollo del cultivo se consideró el tiempo cuando el 50 % de las plántulas estaban en los eventos fenológicos de emergencia de plántula, cotiledones extendidos, primera y segunda hoja. Además, se calculó el tiempo térmico mediante el cálculo de grados día de desarrollo (*GDD*) usando el método de Manrique y Hodges (1989):

$$\text{GDD} = 0 \text{ cuando } T_{m24h} < T_b;$$

$$\text{GDD} = K \cdot \left[1 - (T_{m24h} - T_b)^2 / (T_{opt} - T_b)^2 \right] \text{ cuando } T_b \leq T_{m24h} < T_{opt};$$

$$\text{GDD} = K \cdot \left[1 - (T_{m24h} - T_b)^2 / (T_{mc} - T_{opt})^2 \right] \text{ cuando } T_{opt} \leq T_{m24h} < T_{mc};$$

$$\text{GDD} = 0 \text{ cuando } T_{m24h} \geq T_{mc}.$$

donde:

T_{m24h} es la temperatura media del aire diaria (°C);

T_b es la temperatura mínima de crecimiento (°C);

T_{opt} es la temperatura óptima de crecimiento (°C);

T_{mc} es la temperatura máxima de crecimiento (°C);

K es un factor de escala.

se considera $K = 10$ (valor estándar).

El valor óptimo de los parámetros T_b , T_{opt} y T_{mc} se calculó mediante algoritmos genéticos con el programa GeneHunter® Ward Systems. La función objetivo fue el coeficiente de variación (CV) de los valores de GDD calculados para el primer estado fenológico en las dos fechas de cultivo ($F1$ y $F2$). Se estableció un tamaño de población de 100 individuos, longitud de cromosoma de 16 bits, una tasa de mutación de 0.01; se usó una tasa de cruzamiento de los cromosomas de 90 %, y el programa paró después de 75 generaciones sin cambio.

5.7.3. Variables fisiológicas

5.7.3.1. Biomasa seca total y por órgano vegetal

Se realizaron muestreos destructivos cada cuatro días, de cuatro plántulas por microtúnel, tomando solo aquellas que se encontraban en competencia completa. Primero, se lavó el cepellón para retirar la turba adherida a las raíces, y en seguida se envolvieron las plántulas en sanitas humedecidas con agua destilada para evitar deshidratación. Las plántulas se dividieron en sus órganos principales tallo, hoja y raíz. Cada órgano se metió en sobres de papel, los cuales se pusieron a secar en una estufa de aire forzado marca FELISA® a 75 °C por 72 h o hasta alcanzar peso constante. El peso de la biomasa seca se obtuvo con una balanza analítica marca Sartorius modelo 1474. A partir de los pesos de biomasa seca de cada órgano y la

densidad de plantas por metro cuadrado (899.1) se calcularon las variables de biomasa total (B_{stot} , g m⁻²) tallo (B_{st} , g m⁻²), hoja (B_{sh} , g m⁻²) y raíz (B_{sr} , g m⁻²).

Con los datos de biomasa seca acumulada total y en cada órgano, se calculó la fracción de fotoasimilados asignado a cada órgano vegetal; fracción de fotoasimilados asignados a hoja (F_h , %), fracción de fotoasimilados asignados a tallo (F_t , %) y fracción de fotoasimilados a raíz (F_r , %).

5.7.3.2. Longitud de tallo

La longitud del tallo (L_t , cm) se midió después de la división de la plántula, este inicio desde el primer nudo hasta la punta del tallo. Para esta medición se usó un flexómetro marca Truper®.

5.7.3.3. Ancho de tallo

El ancho de tallo (A_t , mm) se midió a la mitad del primer entrenudo de las plantas diseccionadas con un vernier digital de la marca Truper®.

5.7.3.4. Área foliar

Para obtener el área foliar (AF , m² planta⁻¹), Las hojas por planta se escanearon en un multifuncional de la marca EPSON® serie 220 y las imágenes digitales se procesaron con el programa de uso libre (ImageJ, National Institutes of Health).

5.7.3.5. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF m² de hoja m⁻² de superficie) se calculó a partir del promedio de AF (m² planta⁻¹) de cuatro plantmas por tratamiento, el cual se multiplicó por la densidad de plantas por metro cuadrado (899.1).

5.7.4. Cálculo de parámetros de las plántulas de tomate

5.7.4.1. Coeficiente de extinción

El coeficiente de extinción (k) se calculó a partir de mediciones de irradiancia fotosintética sobre (I_o , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) y debajo (I_{IAF} , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) del follaje del cultivo con un radiómetro lineal LI-1500 (LI-COR[®], Inc.), y el IAF obtenido al momento de hacer la medición. La ecuación usada para calcular k fue:

$$k = \frac{-\ln\left(\frac{I_{IAF}}{I_o}\right)}{IAF}$$

donde:

I_{IAF} es la irradiancia medida bajo el dosel del cultivo;

I_o es la irradiancia medida sobre el dosel del cultivo;

IAF es el índice de área foliar.

5.7.4.2. Área foliar específica

El área foliar específica específica (AFE , m^2g^{-1}), se calculó a partir de la relación entre el AF (m^2) y el peso del área foliar (B_{sh} , g m^{-2}) promedio de cuatro plantas por tratamiento.

5.7.4.3. Eficiencia en el uso de la radiación solar

La eficiencia en el uso de la radiación solar (EUR , g MJ^{-1}) se obtuvo del valor de la pendiente de la relación lineal entre la biomasa seca acumulada (g m^{-2}) y la irradiancia solar acumulada transmitida por el plástico ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

5.7.5. Rendimiento cuántico, punto de saturación por luz, punto de compensación por luz, y tasa de asimilación neta.

Para calcular el rendimiento cuántico (Φ , $\mu\text{mol de CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ de fotones), punto de saturación por luz (P_{sl} , $\mu\text{mol de fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$), punto de compensación por luz (P_{cl} , $\mu\text{mol de fotones m}^2 \text{s}^{-1}$), y la capacidad fotosintética neta (F_g , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$); se realizaron cinéticas fotosintéticas para cada ambiente con un equipo portátil para medir fotosíntesis marca LICOR® (Licor, Inc.; Lincoln, NE, EE. UU.) y un aditamento especial (6400-02B LED Light source) que permite controlar la intensidad de luz bajo un programa ya establecido; además, es capaz de controlar el flujo y concentración de CO_2 gracias a un dosificador de gas (6400-01 CO_2 Mixer).

Se realizaron 3 cinéticas de crecimiento, una para cada tratamiento o ambiente (6-27, 6-35 y 6-40 °C) y con 3 repeticiones. Las cinéticas fotosintéticas se iniciaron alrededor de las 10:00 h y cada una de ellas se llevó a cabo en un día diferente (ambiente 6-27 °C el 20 de julio del 2017, 6-35 °C el 21 de julio del 2017 y el ambiente 6-35 °C 19 de julio del 2017).

Para realizar las mediciones en cada ambiente, se modificó el sistema de control (SC) para que mantuviera constante la temperatura del microtúnel. Cada temperatura del aire programada para el microtúnel coincidía con la temperatura programada en la cámara del equipo portátil de fotosíntesis de tal forma que la temperatura del aire sería similar a la temperatura de la hoja evaluada.

5.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo con el software R Development Core Team (2018), el cual funciona bajo un entorno libre para computación y gráficos estadísticos. En R® se ejecutó la prueba de “t-student” para determinar si existen diferencias significativas entre las variables y parámetros de cada tratamiento. Se hizo una comparación de medias bajo un análisis de contrastes para

algunas variables respuesta. se realizaron correlaciones entre las variables de crecimiento y morfológicas con cada una de las variables de temperatura.

5.9. Modelo de crecimiento

5.9.1. Generalidades

El modelo de predicción propuesto es una simplificación del modelo de Heuvelink (2005) para la producción de tomate en invernadero, solo que nuestro modelo no contempla la producción de fruto ni las variables de estado, parámetros y tasas de cambio relacionadas, ya que la producción de plántulas en invernadero se extiende solo hasta la aparición de las primeras hojas extendidas. Los valores para los parámetros requeridos por el modelo fueron obtenidos a partir de la literatura y experimentalmente.

El modelo se construyó con base en las investigaciones de Goudriaan y Van Laar (2012) y Heuvelink (2005). Se usó la denominación de variables original descritas por Goudriaan y Van Laar (2012). El cálculo de grados día desarrollo (*GDD*) se hizo a partir del método sugerido por Manrique y Hodges (1989). Por otro lado, la eficiencia en el uso de la radiación (*EUR*) y la partición de fotoasimilados a los diferentes órganos de la plántula de tomate fueron obtenidos experimentalmente.

El modelo de predicción consta de 2 variables ambientales de entrada: la irradiancia solar ($J\ m^{-2}\ s^{-1}$) y la temperatura del aire (T_a , °C). Las variables de estado: biomasa total (B_{stot} , $g\ m^{-2}$) tallo (B_{st} , $g\ m^{-2}$), hoja (B_{sh} , $g\ m^{-2}$) y raíz (B_{sr} , $g\ m^{-2}$).

5.9.2. Construcción del modelo

El modelo se creó en el lenguaje de programación C++. El código fue escrito bajo el compilador DEV-C++ desarrollado por Bloodshed Software hasta 2005 y Orwell (Johan Mes) desde 2011 usando programación estructurada.

5.9.3. Componentes del modelo

5.9.3.1. Parámetros iniciales

Los parámetros iniciales que necesita el modelo propuesto son: biomasa seca inicial total ($B_{stot,i}$ g m⁻²), biomasa seca inicial tallo ($B_{st,i}$ g m⁻²), biomasa seca inicial hoja ($B_{sh,i}$ g m⁻²), biomasa seca inicial raíz ($B_{sr,i}$ g m⁻²), índice de área foliar inicial (IAF_i , m² m⁻²) y grados días desarrollo acumulados inicial (GDD_i , adim). Cada valor para las variables iniciales se obtuvieron a partir del primer muestreo de cada tratamiento para las dos fechas de cultivo.

5.9.3.2. Irradiancia fotosintética sobre el cultivo

La Irradiancia fotosintética sobre el cultivo (I_{fs} , MJ m⁻² d⁻¹) se calculó con la siguiente ecuación:

$$I_{fs} = I_i * (Tp_r/100) * F_{PAR}$$

donde:

Tp_r es la transmisión de la cubierta plástica de los microtúneles (%);

I_{fs} es la Irradiancia fotosintética sobre el cultivo (MJ m² s⁻¹);

I_i es la Irradiancia solar al exterior del túnel (MJ m² s⁻¹);

F_{PAR} es la Fracción de irradiancia solar sobre la banda fotosintética (Adim);

se considera que $Tp_r = 46$ % y que $F_{PAR} = 0.50$.

5.9.3.3. Temperatura media diaria

La temperatura media diaria (T_{m24h} , °C) diaria se obtuvo del promedio de la T_a cada 15 min obtenida de los registradores electrónicos Hobo® en cada microtúnel.

5.9.3.4. Desarrollo fenológico

La acumulación de grados días desarrollo (GDD) en cada evento fenológico se obtuvo mediante el método de Manrique y Hodges (1989). La temperatura óptima de crecimiento (T_{opt}), temperatura mínima de crecimiento o temperatura base (T_b) y la temperatura máxima de crecimiento (T_{mc}), se obtuvieron con base en la metodología descrita en el apartado 5.7.2.

5.9.3.5. Fracción de radiación absorbida por el cultivo

La fracción de radiación absorbida (f , adim) se calculó con base en una adaptación a la ley de Beer-Lambert:

$$f = 1 - e^{-k \cdot IAF}$$

donde:

f es la fracción de radiación absorbida (adim);

k es el coeficiente de extinción (adim);

IAF es el índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$);

e es el número de Euler (adim).

5.9.3.6. Radiación absorbida por el follaje

La radiación absorbida por el follaje (I , $J m^{-2} s^{-1}$) se calculó con la siguiente ecuación:

$$I = I_{fs} * f$$

donde:

I es la irradiancia absorbida por el follaje ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

f es la fracción de radiación absorbida por el follaje;

I_{fs} es la irradiancia incidente sobre el follaje ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

5.9.3.7. Producción de asimilados

La producción de asimilados es una adaptación de la propuesta hecha por Goudriaan y Van Laar (2012) para el cálculo de fotosíntesis neta en función de la temperatura. Sin embargo, se incorporaron algunos cálculos y parámetros de la bibliografía existente.

5.9.3.8. Punto de compensación por CO₂

El Punto de compensación por CO₂ (Γ , $\mu\text{g CO}_2 \text{m}^{-3}$) fue calculado a partir de la propuesta por Brooks y Farquhar (1985) para el cultivo de espinaca. La ecuación que se usó fue:

$$\Gamma = 42.7 + 1.68(T_a - 25) + 0.012(T_a - 25)^2$$

donde:

Γ es el punto de compensación de CO₂;

T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$).

5.9.3.9. Rendimiento cuántico

El rendimiento cuántico (ε , $\mu\text{g CO}_2 \text{ J}^{-1}$) se obtuvo mediante la corrección del rendimiento cuántico potencial con el punto de compensación de CO_2 de acuerdo con la ecuación propuestas por Goudriaan y Van Laar (2012):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \frac{C_a - \Gamma}{(C_a + 2) * \Gamma}$$

donde:

ε es el rendimiento cuántico actual ($\mu\text{g CO}_2 \text{ J}^{-1}$);

ε_0 es el rendimiento cuántico potencial ($\mu\text{g CO}_2 \text{ J}^{-1}$);

C_a es la concentración de CO_2 ambiental ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-3}$);

Γ es el punto de compensación de CO_2 ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-3}$).

5.9.3.10. Conductancia del mesófilo

La Conductancia del mesófilo (g_m , cm s^{-1}) se calculó a partir de la interpolación de datos de una tabla que relaciona la temperatura ambiental ($^{\circ}\text{C}$) con la conductancia estomática (cm s^{-1}). Esta tabla (Cuadro 7) se obtuvo a partir de los datos propuestos por Bertin y Heuvelink (1993) para el modelo TOMSIM ver 1.0.

Cuadro 7. Cálculo de la conductancia del mesófilo (g_m).

Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Conductancia del mesófilo (cm s^{-1})
0	0
15	0.4
25	0.4
40	0

5.9.3.11. Resistencia del mesófilo al CO₂

La resistencia del mesófilo (r_m , s¹ m⁻¹) se calcula a partir del inverso de la conductancia del mesófilo:

$$r_m = \frac{1}{g_m}$$

donde:

r_m es la resistencia del mesófilo al CO₂ (s m⁻¹);

g_m es la conductancia del mesófilo al CO₂ (m s⁻¹).

5.9.3.12. Carboxilación limitada por fotosíntesis neta

Como la Carboxilación limitada por fotosíntesis neta (F_{nc} , $\mu g CO_2 m^{-2} s^{-1}$) es calculada a partir de la concentración ambiental de CO₂, se usa la ley de los gases para obtener esta variable en función de la temperatura:

$$gaslaw = (44/24) * (293/(273 + T_a)) * 1000$$

donde:

$gaslaw$ es la concentración ambiental de CO₂ en función de la temperatura ($\mu g CO_2 m^{-3}$);

T_a es la temperatura del aire (°C).

Por lo que:

$$F_{nc} = (C_a - \Gamma) * gaslaw / (r_m + (1.6 * r_s) + (1.6 * r_{bv}))$$

donde:

F_{nc} la carboxilación limitada por la fotosíntesis neta ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

C_a es la concentración ambiental de CO_2 ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-3}$);

Γ es el punto de compensación de CO_2 ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-3}$);

g_{aslaw} es la concentración ambiental de CO_2 en función de la temperatura ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-3}$);

r_m es la resistencia del mesófilo (s m^{-1});

r_s es la resistencia estomática (s m^{-1});

r_{bv} es la resistencia al vapor de agua por la capa de frontera (s m^{-1}).

Los parámetros $r_m = 50 \text{ s m}^{-1}$ y $r_{bv} = 100 \text{ s m}^{-1}$ fueron obtenidos a partir de los valores propuestos por Bertin y Heuvelink (1993) para el modelo TOMISM versión 1.0.

5.9.3.13. Máxima capacidad fotosintética

Goudriaan y Van Laar (2012) propone obtener la máxima capacidad fotosintética ($F_{mm}, \mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) mediante la interpolación entre este parámetro y la temperatura del aire. Los valores de interpolación son obtenidos de datos de campo donde la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) se encuentra en el eje de las abscisas y F_{mm} en el eje de las ordenadas. Los datos para la interpolación se obtuvieron de Bertin y Heuvelink (1993) y que son usados en el modelo TOMISIM ver. 1.0 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cálculo de la máxima capacidad fotosintética (F_{mm})

Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)	F_{mm}
0	0
15	45
25	45
40	0

donde: F_{mm} es la máxima capacidad fotosintética ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

5.9.3.14. Máxima tasa de asimilación

La máxima tasa de asimilación ($F_{n,max}$, $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) es limitada ya sea por F_{mm} o F_{nc} . Basados en esto, el valor de $F_{n,max}$ fue determinado por el valor menor entre F_{mm} y F_{nc} .

5.9.3.15. Tasa de respiración oscura

La tasa de respiración oscura (R_d , $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), es calculada a partir de la ecuación:

$$R_d = PR_d * Q_{10}^{(T_a - T_r)/10}$$

donde:

R_d es la tasa de respiración oscura ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

PR_d es la tasa respiración en función de la temperatura de referencia ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

Q_{10} = Coeficiente de temperatura;

T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$);

T_r es la temperatura de referencia ($^{\circ}\text{C}$).

se considera $Q_{10} = 2$ y $T_r = 31$.

5.9.3.16. Máxima tasa de asimilación total

La máxima tasa de asimilación total ($F_{g,max}$, $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) está determinada por la suma de $F_{n,max}$ y R_d .

$$F_{g,max} = F_{n,max} + R_d$$

donde:

$F_{g,max}$ es la tasa máxima de asimilación total ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

R_d es la respiración actual ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

$F_{n,max}$ es la tasa máxima de asimilación neta ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

5.9.3.17. Tasa de asimilación total

La tasa de asimilación total ($F_g, \mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) cuando F_g es mayor a 0, entonces se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_g = F_{g,max} * (1 - e^{(-\varepsilon*I)/F_{g,max}})$$

donde:

F_g es la tasa de asimilación total ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

$F_{g,max}$ es la tasa máxima de asimilación completa ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

ε es el rendimiento cuántico actual ($\mu\text{g CO}_2 \text{ J}^{-1}$);

I es la irradiancia absorbida por el follaje ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

5.9.3.18. Tasa de asimilación neta

La tasa de asimilación neta ($F_n, \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), se calculó con base en la diferencia entre F_g y R_d .

$$F_n = F_g - R_d$$

donde:

F_n es la tasa de asimilación neta ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

F_g es la tasa de asimilación total ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$);

R_d es la respiración actual ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

5.9.3.19. Repartición de asimilados

La repartición de asimilados de la planta fue determinada a partir de los datos de campo correspondiente a la cantidad de biomasa acumulada en órganos. De esta forma, la fracción de asimilados destinados para cada órgano es obtenida a partir de un factor de conversión correspondiente al porcentaje de asimilados asignados a tallo, hoja y raíz.

5.9.3.20. Índice de área foliar

El Índice de área foliar ($IAF, m^2 m^{-2}$) es calculado al final del cálculo de la producción y repartición de asimilados con la ecuación:

$$IAF_n = AFE * F_h * F_n$$

donde:

IAF_n es el nuevo índice de área foliar ($m^2 m^{-2}$);

AFE es el área foliar específica ($m^2 g^{-1}$);

F_h es la fracción de fotoasimilados asignados a la hoja;

F_n es la tasa de asimilación neta ($\mu g CO_2 m^{-2} s^{-1}$).

5.9.4. Evaluación del desempeño o precisión del modelo de crecimiento

Para la evaluación del modelo propuesto se hizo un análisis del error mediante la comparación en el plano cartesiano de los datos observados y modelados. Se llevaron a cabo 4 análisis entre estas dos variables, uno por cada variable de biomasa acumulada (total, tallo, hoja y raíz). A partir de esta comparación se realizó una regresión lineal para conocer cuál era la capacidad predictiva, así como su exactitud (valor de r^2).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Radiación solar diaria

El promedio de radiación solar diaria transmitida por el plástico (RS_t) durante la primera fecha de cultivo ($F1$) fue de $7.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, y de $6.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante la segunda fecha de cultivo ($F2$), con una diferencia entre fechas de $0.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (cuadro 9). No obstante, el coeficiente de variación (CV) de esta variable fue relativamente alto en ambas fechas, debido al cubrimiento intermitente de la bóveda celeste por nubosidad durante el periodo de lluvias.

Cuadro 9. Estadísticos descriptivos y prueba de medias de radiación solar diaria transmitida por el plástico e incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) sobre plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Fecha de cultivo	Media	Mediana	S	CV (%)
$F1$	7.1 a	6.5	1.9	27.0
$F2$	6.2 a	5.6	1.8	29.7

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t-de Student” ($\alpha = 0.05$).

El comportamiento de la RS_t puede observarse en la figura 1; en la $F1$ no se aprecia una tendencia clara mientras que RS_t de la $F2$ fue aparentemente disminuyendo.

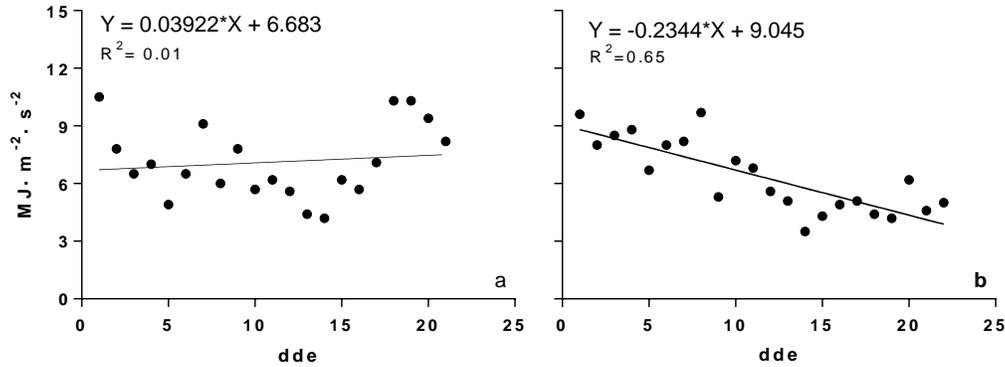


Figura 1. Radiación solar diaria (RS_t , MJ m⁻² d⁻¹) transmitida por el plástico lechoso que cubre los microtúneles del a) 26 de junio al 16 de julio 2017 (F_1) y b) 17 de agosto al 10 de septiembre de 2017 (F_2).

Sin embargo, la prueba “t-student” ($\alpha = 0.05$) descartó diferencias significativas de RS_t entre fechas.

6.2. Temperatura del aire

La temperatura mínima de aire ($T_{mín}$) dentro de cada ambiente fue en promedio 7 °C superior a lo programado con el sistema de control. Con respecto a la temperatura máxima del aire ($T_{máx}$), solo en el ambiente con una oscilación térmica de 6 a 40 °C en la F_1 se obtuvo la $T_{máx}$ programada. En los otros ambientes, $T_{máx}$ fue 1 °C menor (ambiente 6-35 °C en ambas fechas de cultivo) o hasta 4 °C mayor (ambiente 6-27 °C en F_2) que la $T_{máx}$ programada (Cuadro 10).

Cuadro 10. Comportamiento real de la temperatura del aire (T_a) dentro de los ambientes bajo microtúneles cubiertos con plástico lechoso, para cultivar plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Ambiente programado	F1			F2		
	$T_{mín}$ (°C)	T_{m24h} (°C)	$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	T_{m24h} (°C)	$T_{máx}$ (°C)
6-27	12	19	29	14	20	31
6-35	12	20	34	13	21	34
6-40	13	21	40	13	22	38

Media de temperatura del aire mínima ($T_{mín}$), media de 24 h (T_{m24h}), y máxima ($T_{máx}$).

Se presentaron diferencias entre los ambientes programados y los reales. Esta diferencia fue ocasionada por las altas temperaturas ambientales que se suscitaron durante nuestra fase experimental, ya que estas ocasionaron que las temperaturas al interior de los microtuneles sobrepasaran la capacidad de enfriamiento de los extractores instalados.

Como la RS_t fue similar en ambas fechas de cultivo, y solo varió la T_a en cada ambiente, entonces los tratamientos se redefinieron con base en la temperatura mínima y máxima, por lo que se obtuvieron 6 tratamientos (Cuadro 11).

En el Cuadro 12 se observa que $T1$ y $T3$ (F1) presentaron la menor $T_{mín}$ y solo fueron estadísticamente diferente de $T2$. Con respecto a la $T_{máx}$, T_{osc} y T_{DIF} , las medias se agruparon en 3 grupos, donde $T5$ y $T6$ presentaron las mayores medias, mientras que $T1$ y $T2$ presentaron las menores medias en estas variables. En cuanto a T_{md} el tratamiento $T6$ presentó la mayor media y $T1$ la menor; en esta variable derivada de la temperatura las diferencias estadísticas entre tratamientos fueron muy cercanas, siendo el grupo $T6$ y $T5$ contra el grupo $T2$ y $T1$ los más contrastantes. Los tratamientos $T4$, $T2$ y $T5$ no presentaron diferencias significativas en cuanto a T_{m24h} , siendo $T4$ solo diferente de $T3$ y $T1$, así como $T2$ de $T1$. La T_{mn}

presento diferencias en los promedio mas bajos (T1 y T3) con todos los demas tratamientos (T4, T2, T5 y T6), de los cuales solo T6 presento diferencias con T4.

Cuadro 11. Tratamientos experimentales definidos con base en la temperatura del aire mínima (T_{min}) y máxima (T_{max}) dentro de los ambientes bajo microtúneles cubiertos con plástico lechoso.

Temperatura								
Tratamiento	del aire	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	T_{md} (°C)	T_{m24h} (°C)	T_{mn} (°C)	T_{osc} (°C)	T_{DIF} (°C)
	$T_{min} - T_{max}$							
T1	12 - 29	12.3 ± 1.6	29.4 ± 3.0	21.2 ± 1.6	18.5 ± 0.9	15.0 ± 0.6	17.1 ± 3.9	6.2 ± 1.7
T2	14 - 31	13.5 ± 1.7	30.7 ± 5.8	23.0 ± 3.9	20.0 ± 2.6	16.5 ± 1.3	17.2 ± 5.1	7.0 ± 2.6
T3	12 - 34	12.4 ± 1.7	34.1 ± 2.6	23.0 ± 1.5	19.5 ± 1.0	15.0 ± 0.9	21.8 ± 3.5	8.0 ± 1.7
T4	13 - 34	12.7 ± 1.3	33.9 ± 2.8	24.4 ± 2.8	20.8 ± 1.8	16.7 ± 1.1	21.3 ± 3.3	8.0 ± 1.8
T5	13 - 38	13.2 ± 1.4	37.7 ± 3.7	26.0 ± 3.4	21.5 ± 2.1	16.3 ± 1.0	24.5 ± 4.3	10.0 ± 2.7
T6	13 - 40	13.1 ± 1.7	39.7 ± 2.6	25.8 ± 1.7	21.5 ± 1.1	16.0 ± 1.0	26.6 ± 3.5	9.8 ± 1.8

Media de temperatura del aire mínima (T_{min}), máxima (T_{max}), diurna (T_{md}), de 24 h (T_{m24h}), nocturna (T_{mn}), oscilacion térmica (T_{osc}) y diferencia (T_{DIF}).

Cuadro 12. Variables derivadas de la temperatura del aire durante las dos fechas de cultivo (*F1* y *F2*) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (*F1*) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (*F2*).

T_{min}			T_{max}			T_{md}			T_{m24h}			T_{mn}			T_{osc}			T_{DIF}		
Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)	Tra t	Ambient e	(°C)
T2	14-31	13.5 a	T6	13-40	39.7 a	T6	13-40	28.1 a	T5	13-38	21.5 a	T4	13-34	16.8 a	T6	13-40	26.6 a	T6	13-40	26.6 a
T5	13-38	13.2 ab	T5	13-38	37.7 a	T5	13-38	26.7 ab	T6	13-40	21.5 a	T2	14-31	16.5 ab	T5	13-38	24.5 a	T5	13-38	24.5 a
T6	13-40	13.1 ab	T3	12-34	34.1 b	T4	13-34	25.0 bc	T4	13-34	20.8 ab	T5	13-38	16.4 ab	T3	12-34	21.8 b	T3	12-34	21.8 b
T4	13-34	12.7 ab	T4	13-34	33.9 b	T3	12-34	24.9 c	T2	14-31	20.0 bc	T6	13-40	16.0 b	T4	13-34	21.3 b	T4	13-34	21.3 b
T3	12-34	12.4 b	T2	14-31	30.7 c	T2	14-31	23.5 cd	T3	12-34	19.5 cd	T1	12-29	15.0 c	T2	14-31	17.2 c	T2	14-31	17.2 c
T1	12-29	12.3 b	T1	12-29	29.4 c	T1	12-29	22.8 d	T1	12-29	18.5 d	T3	12-34	15.0 c	T1	12-29	17.1 c	T1	12-29	17.1 c

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ($\alpha = 0.05$). T_a = Temperatura del aire (°C); DIF = Diferencia entre T_{media} diurna y T_{media} nocturna (°C). Media de temperatura del aire mínima (T_{min}), máxima (T_{max}), diurna (T_{md}), de 24 h (T_{m24h}), nocturna (T_{mn}), oscilacion térmica (T_{osc}) y diferencia (T_{DIF}).

6.3. Etapas Fenológicas

La optimización con algoritmos genéticos dio como resultado 11 °C para la temperatura mínima de crecimiento (T_b); este valor difiere en 1 °C de la T_b de 10 °C propuesta por Gould (2013) y van Dam *et al.* (2005). En cuanto a la temperatura óptima de crecimiento (T_{opt}), el resultado fue 24 °C, valor que se encuentra por encima de los 21 °C propuesto por Heuvelink (1989) para plántulas de tomate. No obstante, van Dam, Goffau *et al.* (2005) reportan una T_{opt} de plántulas de tomate de 21 °C a 24 °C. En cuanto a la temperatura máxima de crecimiento T_{mc} , con el proceso de optimización se calcularon 38 °C de T_{mc} , valor que coincide con el propuesto por van Dam *et al.* (2005) para tomate bajo condiciones de campo. Gould (2013) propone 35 °C como T_{mc} para tomate cultivado bajo condiciones de campo, y 32 °C para plántulas de tomate, valor que es 6 °C menor al obtenido en nuestra investigación. A excepción de la T_{mc} , tanto la T_b como la T_{opt} son similares a las propuestas de otros autores para tomate, por lo que se decidió usar estas temperaturas cardinales optimizadas para el cálculo de grados día de desarrollo (GDD).

La cantidad de GDD necesarios para alcanzar los estados fenológicos de primera y segunda hoja extendida son 114 y 184 GDD , respectivamente. Estos resultados presentan coeficientes de variación mayores a 11 % (Cuadro 13).

Cuadro 13. Grados días desarrollo (*GDD*) para alcanzar la primera y segunda hoja extendida de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	T_a ($T_{min} - T_{max}$)	1ra hoja		2da hoja	
		<i>GDD</i>	<i>DDE</i>	<i>GDD</i>	<i>DDE</i>
<i>T1</i>	12 - 29	139	17	171	21
<i>T2</i>	14 - 31	107	12	190	22
<i>T3</i>	12-34	131	15	175	20
<i>T4</i>	13-34	104	11	184	20
<i>T5</i>	13-38	97	10	224	24
<i>T6</i>	13-40	106	11	162	17
Media		114	13	184	21
S		16.8	3	21.6	2.3
C.V. (%)		14.7	22	11.7	11

T_a = Temperatura del aire (°C); *S* = Desviación estándar; *C.V.* = Coeficiente de variación.

Los *GDD* calculados en el *T1* (12-29 °C) y *T5* (13-38 °C) para alcanzar el estado fenológico de la primera y segunda hoja completamente extendida, respectivamente, fueron los más alejados de la media de los tratamientos (Cuadro 11) y no parece existir un patrón que relacione los tratamientos con los *GDD* acumulados para cada etapa fenológica. El cálculo de los *GDD* presentó un coeficiente de variación relativamente alto debido a la dificultad para determinar cuándo una hoja se encuentra completamente extendida.

6.4. Área foliar específica

La mayor media de área foliar específica (*AFE*, m² g⁻¹) se observó en el *T4* (13-34 °C) y fue estadísticamente diferente a los valores de la media de *T1* (12-29 °C) y *T3* (12-34 °C) (Cuadro 11). La relación entre *AFE* y las temperaturas diurna y/o

nocturna fue descrito por Heuvelink (1989); este autor afirma que una diferencia positiva (DIF) (temperatura nocturna menor a la diurna) o negativa (temperatura nocturna mayor a la diurna) aumenta o disminuye el *AFE*, respectivamente. Si fuera el caso, entonces conforme disminuye DIF debería disminuir el *AFE*, lo cual no se observa en nuestros resultados (Cuadro 14).

De acuerdo con Hurd y Thornley (1974), la integral diaria de radiación solar incidente también modifica el *AFE*. Estos autores encontraron que con $9.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ el *AFE* disminuyó a un valor aproximado de $0.015 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$; en contraste, $0.28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ aumentaron el *AFE* a $0.060 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$. También, Jones *et al.* (1988) encontraron una relación positiva entre *AFE* y la temperatura, así como una relación negativa entre la *AFE* con la concentración de CO_2 y la radiación solar. En nuestra investigación, la radiación global incidente dentro de los microtúneles no fue diferente entre fechas de cultivo, por lo cual no es una variable que afectó al *AFE*.

Cuadro 14. Área foliar específica (*AFE*, $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	$(T_{\text{mín}} - T_{\text{máx}})$	T_{DIF}	<i>AFE</i>
T4	13 - 34	7.7	0.065 a
T2	14 - 31	6.5	0.059 ab
T6	13 - 40	9.8	0.058 ab
T5	13 - 38	9.7	0.052 ab
T3	12 - 34	8.0	0.050 b
T1	12 - 29	6.2	0.049 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba "t de student" ($\alpha = 0.05$). T_a = Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); T_{DIF} = Diferencia entre T_{media} diurna y T_{media} nocturna ($^{\circ}\text{C}$).

6.5. Índice de área foliar

La mayor media de IAF se observó en el $T4$ (13-34 °C) con $8.16 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Cuadro 15). Las medias de IAF de los tratamientos $T2$, $T3$, $T5$ y $T6$ fueron iguales (5.3 a $6.7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). En cambio, la menor media de IAF se observó en el $T1$ (12-29 °C), la cual fue diferente estadísticamente con respecto a la media del IAF de los tratamientos $T4$ y $T2$. Solo en los tratamientos $T2$ y $T4$ se obtuvo un valor de IAF mayor al crítico (Cuadro 15).

Cuadro 15. Media del índice de área foliar (IAF , $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) y absorbencia (%) del follaje por tratamiento de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	T_a ($T_{mín} - T_{máx}$)	IAF	absorbencia (%)
$T4$	13 - 34	8.16 a	97.9
$T2$	14 - 31	6.77 b	95.4
$T6$	13 - 40	6.34 bc	95.0
$T3$	12 - 34	5.90 bc	93.4
$T5$	13 - 38	5.34 bc	92.9
$T1$	12 - 29	5.20 c	91.0

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student” ($\alpha = 0.05$) bajo un análisis de contrastes. T_a = Temperatura del aire (°C).

El follaje de las plántulas de tomate absorbió el 95 % de la irradiancia fotosintética cuando el IAF fue de 6.5, el cual se calculó con un k igual a 0.46. Esto difiere con lo obtenido por Heuvelink (2005) quien considera que el IAF crítico y teórico es de 3 bajo un valor constante de k (0.75). En la fase de fructificación para el cultivo de tomate en campo abierto, la absorción de la irradiancia fotosintética es de aproximadamente 50 a 60 %, lo que corresponde a valores de IAF de 4 a $5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Scholberg *et al.*, 2000).

Se ajustaron diversos modelos al comportamiento a través del tiempo del IAF de plántulas de tomate cultivadas en charolas y en microtúneles (Cuadro 16). Los

menores errores estándar y mayores coeficientes de determinación se obtuvieron con los modelos Gaussiano y Exponencial. Sin embargo, el modelo de crecimiento exponencial tiene menor número de parámetros, por lo que éste se prefirió para modelar el incremento del *IAF* a través del tiempo (Figura 2). Este modelo, hace referencia a un comportamiento clásico denominado como crecimiento exponencial descrito por Goudriaan y Van Laar (2012).

Cuadro 16. Ajuste de modelos matemáticos al aumento del índice de área foliar (IAF) en función de los grados día de desarrollo (*GDD*) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Modelo	Ecuación	Parámetro	Error Estándar	R ²
Gaussiano	$y=ae^{-\frac{(b-x)^2}{2c^2}}$	a = 7.00 b = 226.18 c = 84.92	0.65	0.96
Exponencial	$y=ax^b$	a = 0.0026579 b = 1.48	0.65	0.96
Sinusoidal	$y=a+b \cos(cx+d)$	a = 4.05 b = 3.82 c = 0.0121300 d = 3.05	0.66	0.96
Presión de vapor	$y=e^{a+\frac{b}{x}+c \ln(x)}$	a = -3.06 b = -61.65 c = 0.9969000	0.66	0.96
MMF	$y=\frac{ab+cx^d}{b+x^d}$	a = 0.1405000 b = 66941.48 c = 17.22 d = 2.01	0.66	0.96
Polinomial	$y=a+bx+cx^2+dx^3$	a = 0.2840637 b = -0.0087768 c = 0.0003981 d = -0.0000010	0.96	0.96
Geométrico modificado	$y=ax^{\frac{b}{x}}$	a = 25.04 b = -50.05	0.96	0.96

Donde "x" es *GDD* y "y" es el *IAF*. R² = Coeficiente de determinación.

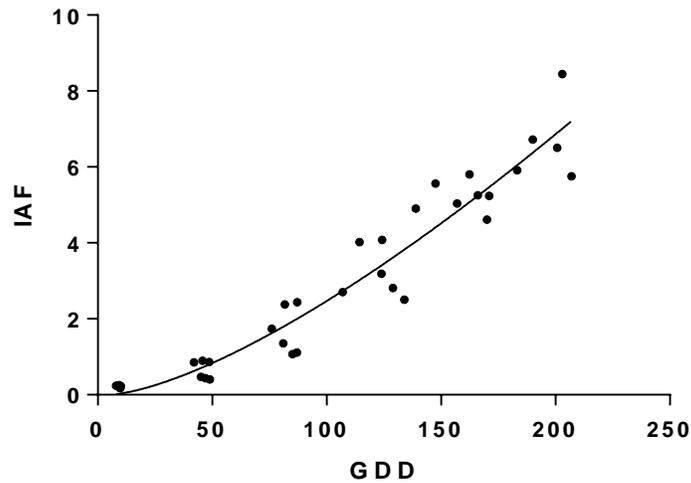


Figura 2. Índice de área foliar (*IAF*) observado (●) y modelado con la función exponencial (—) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) en función de grados días desarrollo (*GDD*).

6.6. Coeficiente de Extinción

El coeficiente de extinción (k) no es afectado por los tratamientos (Cuadro 17) aunque el $T6$ es mayor y cercano a un k de 0.5. Mientras el 4 de julio se observó un k promedio de 0.45, diez días después de esta fecha el promedio de k fue 0.48. Cavero *et al.* (1998) reportan un k de 0.45 para tomate, asociado a un *IAF* de 4.5. Otros autores como De Pascale *et al.* (2015) proponen un valor de k de 0.55 con base en un promedio de valores propuestos por diferentes autores. Cavero, Plant *et al.* (1998), Elia y Conversa (2012), y Ramirez *et al.* (2003) presentan valores de k de 0.5 a 0.9 bajo condiciones de radiación difusa. Sin embargo, estos valores son usados para la producción de tomate en campo. Katsoulas *et al.* (2015) encontraron un valor de k de 0.57 para plántulas de tomate, lo cual es mayor a lo observado en nuestra investigación (Cuadro 17).

Cuadro 17. Coeficiente de extinción (k) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	T_a ($T_{\min} - T_{\max}$)	4 julio 2017	14 julio 2017
T1	12-29	0.44	0.50
T3	12-34	0.43	0.47
T6	13-40	0.47	0.47

T_a = Temperatura del aire (°C)

6.7. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética.

La prueba de medias indica que la eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR , g MJ⁻¹) fue igual entre todos los tratamientos. La EUR de los tratamientos evaluados es mayor que el valor de 2.10 g MJ⁻¹ (PAR) obtenido por Scholberg *et al.* (2000), y mayor al valor de EUR usado por Marcelis *et al.* (2008) en el rango de 2.5 a 3.3 g MJ⁻¹ (PAR) para modelar el crecimiento de tomate en campo. Esto indica que la EUR en plántula es mayor que en cultivos en campo (cuadro 18).

Cuadro 18. Eficiencia en el uso de la radiación completa (EUR , g MJ⁻¹) en la banda fotosintética (PAR) de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	T_a ($T_{\min} - T_{\max}$)	EUR (g MJ ⁻¹)	S	C.V. (%)
T6	13/40	2.08 a	0.30	14.3
T3	12/34	2.02 a	0.23	11.5
T5	13/38	1.94 a	0.26	14.5
T2	14/31	1.91 a	0.32	16.8
T4	13/34	1.77 a	0.27	14.1
T1	12/29	1.67 a	0.28	16.6

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student” ($\alpha = 0.05$) bajo un análisis de contrastes. T_a es la temperatura del aire (°C); S es la desviación estándar; C.V. es el coeficiente de variación (%).

Los cambios en *EUR* en función de la temperatura han sido reportados con anterioridad en otros cultivos. Por un lado, Andrade *et al.* (1993) reporta una correlación positiva ($r = 0.87$) entre *EUR* y la temperatura media diaria en maíz; y un decremento en el valor de la *EUR* asociado con una disminución de la temperatura media nocturna menor a 16 °C en cacahuete (Bell *et al.*, 1992). El efecto de la temperatura en la *EUR* podría estar relacionado con la respuesta fotosintética de la hoja (Sands, 1996) ya que se sabe que la fotosíntesis es un proceso fisiológico sensible al calor, principalmente el fotosistema II, el cual es inhibido a altas temperaturas (Feng *et al.*, 2014). Este comportamiento del aparato fotosintético de plántulas de tomate lo demostró Camejo *et al.* (2005) cuando causó una reducción en la asimilación de CO₂ (afectando el ciclo de Calvin) y el funcionamiento del PSII en variedades sensibles a altas temperaturas por exponerlas a 45 °C por 2 h. Hansen *et al.* (1994) reportaron en un experimento con células de tomate que el crecimiento aumenta exponencialmente en el rango de temperatura entre 10 y 30 °C, fuera de este rango ocurre una pérdida irreversible de la actividad metabólica.

6.8. Rendimiento cuántico

El rendimiento cuántico (Φ , $\mu\text{mol de CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ de fotones), de la hoja superior de tomate recientemente expandida fue 0.06, 0.06 y 0.04 $\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ de fotones a las temperaturas de 28, 31 y 40 °C, respectivamente. La mejor capacidad fotosintética (F_g) fue 14.65 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bajo el ambiente de 31 °C, seguido 8.08 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para el ambiente de 29 °C, mientras que el ambiente a 40 °C presentó la menor F_g (5.05 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Se obtuvo un valor de 1000 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ como punto de saturación en los tres ambientes. Sin embargo, el punto de compensación fue diferente entre ambientes; 120, 6 y 89 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 28, 31 y 40 °C, respectivamente (Figura 3).

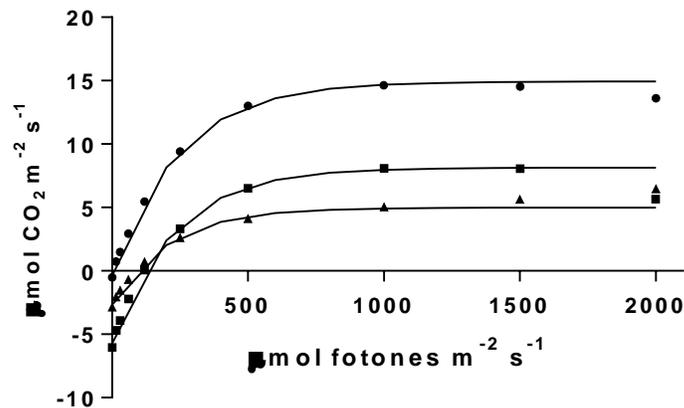


Figura 3. Cinéticas fotosintéticas en 3 diferentes temperaturas. Los puntos representan el valor promedio para los 3 diferentes ambientes (●) 31 °C, (■) 28 °C, (▲) 40 °C y (–) modelo de ajuste.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo presentado por Kozai (2016), quien afirma que la hoja de tomate madura presenta un punto de saturación de 1000 a 1500 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esto contrasta con lo descrito por Peat (1970) quien presenta valores de punto de saturación cercanos a 300 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$, mientras que este autor encontró que F_g de 10 a 20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; en nuestra investigación, solo el valor F_g de las hojas de tomate en el ambiente a 31 °C se encuentra en este rango. Acock *et al.* (1978) presentan datos de saturación de aproximadamente 920 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ con un valor de F_g cerca de los 23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. En cuanto al punto de compensación, Azcón-Bieto y Talón (2008) encontraron valores de este parámetro en el rango de 20 a 30 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para especies de plantas que naturalmente sobreviven expuestas a radiación solar directa, mientras que en plantas de sombra el rango es 1 a 10 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para tomate, (Papadopoulos y Pararajasingham, 1997) encontraron un punto de compensación de 50 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tanto en plantas expuestas directamente al sol como en plantas bajo sombra. En cuanto al rendimiento cuántico, el valor descrito por Azcón-Bieto y Talón (2008) es de $0.05 \pm 0.01 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ de fotones.

6.9. Repartición de Asimilados

Con base en la media global, el mayor porcentaje de asimilados se envió para la formación de hojas mientras que solo el 10 % se envió a la formación de raíces (Cuadro 19). Los C.V. altos de F_r y F_t indican que fue más inconsistente la asignación de fotosintatos a raíz y tallo. La F_r se mantuvo constante a través del tiempo mientras que F_h disminuía y F_t aumentaba (Figura 4).

Cuadro 19. Media de porcentaje de fotosintatos enviados a raíz (F_r , %), tallos (F_t , %) y hojas (F_h , %) en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	F_r	Tratamiento	F_t	Tratamiento	F_h
T5	16.2 a	T6	40.7 a	T1	52.7 a
T2	15.5 ab	T4	38.7 ab	T4	50.5 b
T1	15.0 ab	T3	37.2 ab	T2	49.7 bc
T3	14.7 ab	T5	37.0 ab	T3	48.0 bcd
T6	12.7 bc	T2	34.5 bc	T5	47.0 cd
T4	10.5 c	T1	32.5 c	T6	46.5 d
Global	11.2		26.3		62.5

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t - de student” ($\alpha = 0.05$) bajo un análisis de contrastes. T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$).

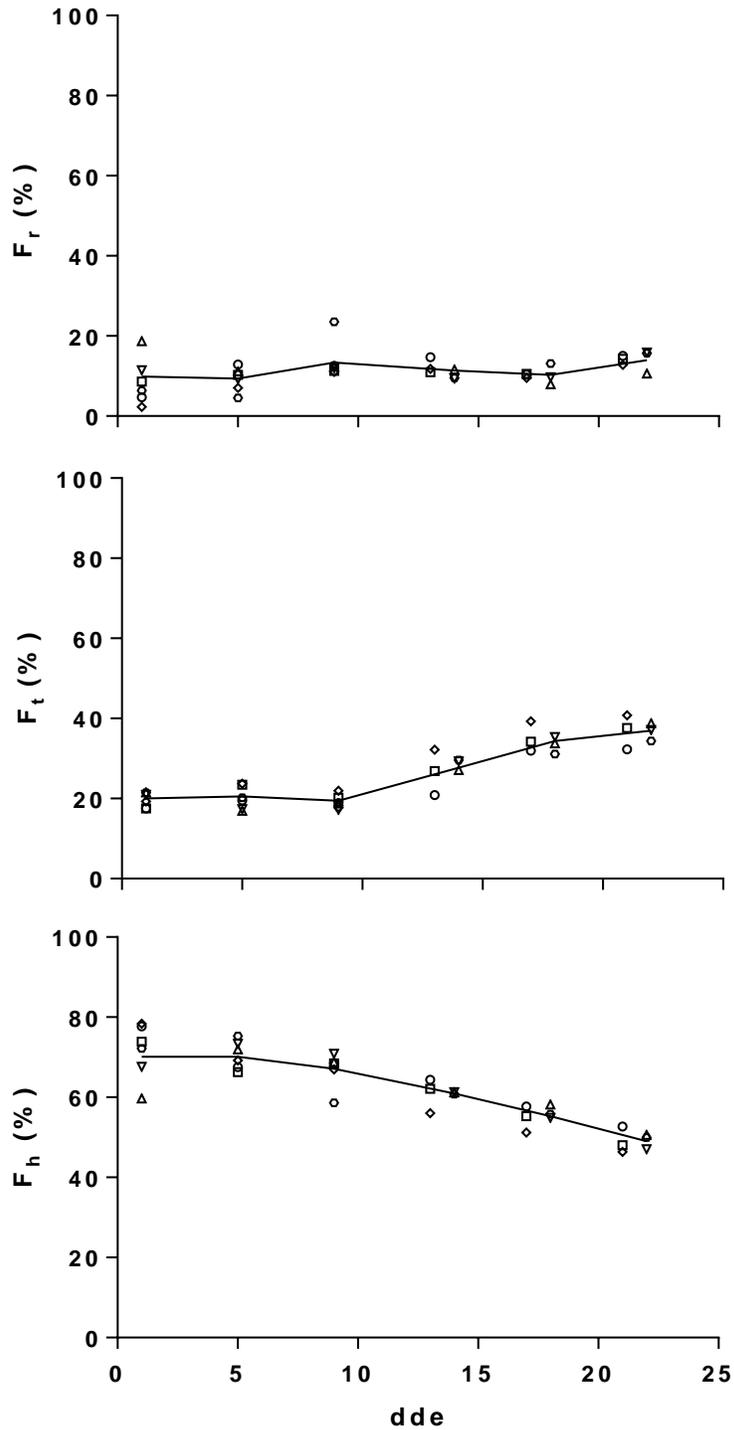


Figura 4. Porcentaje de fotosintatos enviados a raíz (F_r) tallo (F_t) y hoja (F_h) de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F_1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017

(F2). T1 (12/29 °C, ○); T3 (12/34 °C, □); T6 (13/40 °C, ◇); T2 (14/31 °C, ◊); T4 (13/34 °C, △); T5 (13/38 °C, ▽); la línea continua es la tendencia de los datos.

En la Figura 3 se observa que F_h disminuye de 70 a 49 %, mientras que F_t aumenta de 20 a 37 %.

6.10. Acumulación de biomasa

La acumulación de biomasa en raíz no fue diferente entre medias ($\alpha = 0.05$) de los tratamientos al final del experimento (Cuadro 18). Mingo *et al.* (2004) mencionan que la acumulación de biomasa en la raíz está relacionada con las necesidades hídricas del cultivo.

Tampoco se observaron diferencias entre medias ($\alpha = 0.05$) en la acumulación de biomasa en las hojas (Cuadro 20) ni en biomasa total al final del experimento (22 *dde*).

Con respecto a la acumulación de biomasa en el tallo, el mayor valor (101.6 g m⁻²) se observó en T4 y T6 a los 22 y 21 *dde*, respectivamente. Sin embargo, las medias de biomasa de tallo de estos tratamientos solo fueron diferentes con la media de biomasa de tallo del T1 (Cuadro 20). El incremento de biomasa en la parte aérea (tallos y hojas) está relacionado con la calidad de la luz interceptada; esto fue descrito por Kasperbauer y Kaul (1996) quienes afirman que al aumentar la proporción de rojo:rojo lejano (reflejado del suelo) se incrementa la acumulación de biomasa en tallos, hojas y fruto, en contraste, cuando se presenta una relación rojo:rojo lejano menor, entonces se favorece la acumulación de biomasa en el sistema radicular. En cuanto a la temperatura y su relación la acumulación de biomasa, Heuvelink (1995b) afirma que la temperatura no tiene efecto significativo en la repartición de biomasa entre el fruto y las partes vegetativas de la planta de tomate. Por otro lado, Hussey (1963) considera que existe una relación entre temperatura y radiación solar. Para entender mejor el proceso de repartición de

biomasa, sin duda se tiene que estudiar cómo se asignan asimilados entre la parte aérea y radical.

Cuadro 20. Medias de biomasa seca (g m^{-2}) de hoja (B_{sh}), raíz (B_{sr}), tallo (B_{st}) y total (B_{stot}) por tratamiento a los 22 *dde*, de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Trat.	B_{sh}	Trat.	B_{sr}	Trat.	B_{st}	Trat.	B_{stot}
T4	133.1 a	T5	37.5 a	T4	101.6 a	T4	260.7 a
T3	117.8 a	T2	36.4 a	T6	100.7 a	T6	251.8 a
T2	116.0 a	T3	35.2 a	T3	92.6 ab	T3	242.8 a
T6	115.1 a	T6	31.9 a	T5	88.1 ab	T5	233.8 a
T5	110.6 a	T1	31.5 a	T2	79.1 ab	T2	233.5 a
T1	109.7 a	T4	29.9 a	T1	66.5 b	T1	206.8 a

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba "t" de student ($\alpha = 0.05$) bajo un análisis de contrastes. Trat. es tratamiento

6.11. Variables morfológicas

El tratamiento T4 presentó la mayor media de L_t , y fue igual a la media obtenida en el T6 y T2 (Cuadro 21), mientras que el T5 fue el que obtuvo la menor media en esta variable y T1 no se calculó por falta de datos (Cuadro 21). Además, el T4 fue diferente a las medias de los tratamientos T3 y T5. La mayor media de L_r se obtuvo en el T2 y fue diferente a la media de L_r del T4, tratamiento con el cual se obtuvo el menor valor de L_r . En cuanto AF, la media más alta se encontró en el T4 y fue diferente con el resto de los tratamientos. Por lo anterior, se puede indicar que la temperatura tuvo efecto en las variables morfológicas, al igual que en la materia seca y en la repartición de asimilados.

Cuadro 21. Medias de longitud de tallo (L_t , cm), ancho de tallo (A_t , mm), longitud de raíz (L_r , cm) y área foliar (AF , $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) por tratamiento a los 22 dde, de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Trat.	L_t	Trat.	A_t	Trat.	L_r	Trat.	AF
T4	26.1 a	T4	3.0 a	T2	9.3 a	T4	93.9 a
T6	23.5 ab	T6	2.9 ab	T5	9.3 ab	T2	74.6 b
T5	23.4 b	T2	2.8 abc	T1	8.5 ab	T6	72.2 bc
T3	22.5 b	T3	2.7 bc	T6	7.8 ab	T3	65.7 bc
T2	21.9 b	T5	2.6 c	T3	7.6 ab	T5	63.9 bc
T1	17.2 c	T1	NA	T4	7.0 b	T1	58.3 c

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t - de student” ($\alpha = 0.05$) bajo un análisis de contrastes. Trat. es tratamiento.

Con respecto al cambio de L_t en el tiempo, se observa que la máxima velocidad de elongación del tallo se obtiene a los 14 dde (Figura 5), proceso asociado con un IAF de 3.4 (Figura 1b) y un 80 % de radiación absorbida (Figura 1c); a partir del día 15 la velocidad de elongación del tallo fue disminuyendo al igual que radiación absorbida tiende a estabilizarse en una asintota.

El fenómeno de etiolación en plantas de tomate está relacionado más con la calidad de la radiación que con la cantidad. Esto fue descrito por Ballaré *et al.* (1995) quienes afirman que el mecanismo morfogénico de las plantas puede estar involucrado en la altura de planta, propagación de ramas y la distribución de biomasa. Esto lo confirman Papadopoulos y Ormrod (1988) al reportar que la calidad de la radiación transmitida por el dosel (azul:rojo lejano, rojo:rojo lejano y azul:rojo) es alterada por la densidad cuando se aumenta de 2.5 a 11.3 plantas/ m^2 . Es decir, las densidades de planta alta provocan el alargamiento del tallo y los internodos (Papadopoulos, 1991). La causa y base del inicio de este proceso es la expansión foliar, ya que es la directamente responsable de la modificación de la calidad de la radiación solar.

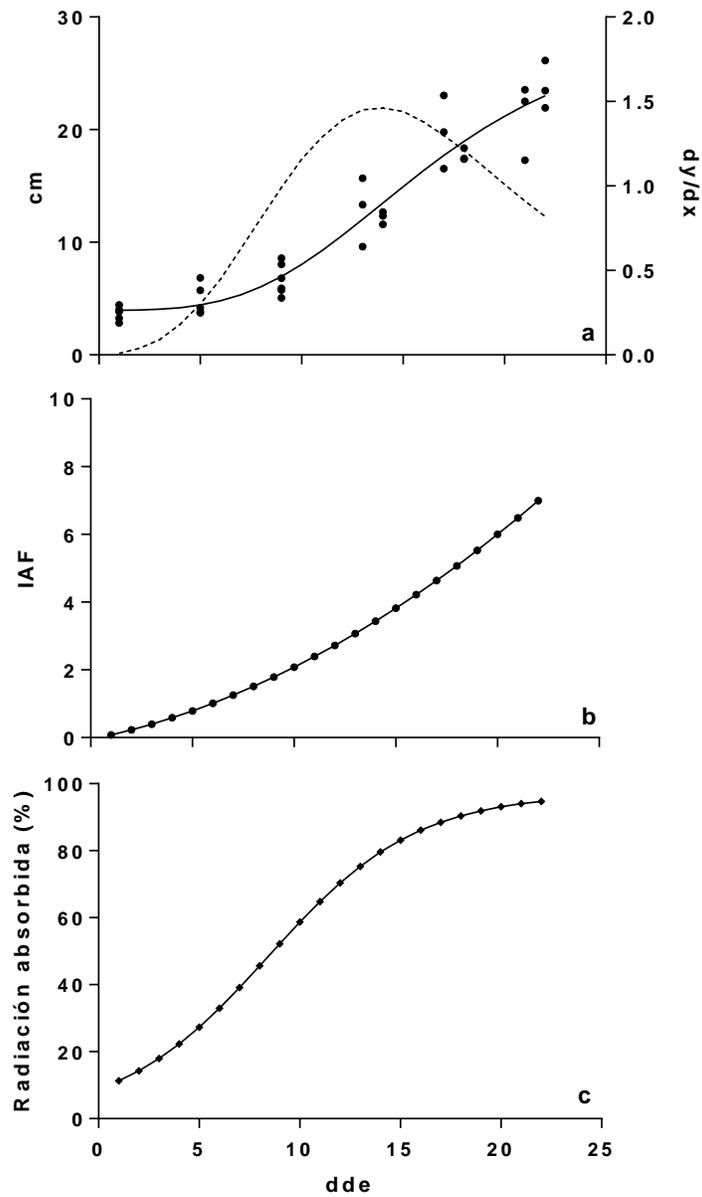


Figura 5. a). a). Modelo para longitud de tallo usando la media de todos los tratamientos (—), primera derivada del modelo ajustado para longitud de tallo (---), muestreos de longitud de tallo para T1, T2, T3, T4, T5 y T6 (●); b). modelo para IAF ($m^2 m^{-2}$), modelo ajustado para IAF a partir de todos los tratamientos (●) y c). modelo ajustado para radiación absorbida (%) (◆). de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

6.12. Correlaciones entre las variables derivadas de la temperatura del aire y las variables y parámetros de las plántulas de tomate

En el Cuadro 22 se observa que la $T_{mín}$ no tiene correlación con ningún parámetro ni variable medida ($R < 0.55$). B_{stot} , B_{sh} , F_r , B_{sr} , L_r y A_t no fueron afectados por las variables derivadas de T_a . A excepción de $T_{mín}$ y T_{mn} , la R^2 entre las variables derivadas de la T_a y la F_t fue de 0.80 a 0.89, mientras que la T_{max} , T_{md} , T_{m24h} , T_{osc} y T_{DIF} se correlacionaron entre 0.69 a 0.76 con B_{st} . En cambio, F_h se correlacionó negativamente con $T_{máx}$, T_{md} , T_{osc} , y T_{DIF} , con valores entre -0.82 y -0.89, y con T_{m24h} ($R^2 = -0.77$). La L_t se correlacionó entre 0.71 a 0.79 con la T_{md} , T_{mn} y T_{m24h} , y solo se observó una R^2 de 0.61 entre L_t y $T_{máx}$. $T_{máx}$, T_{osc} y T_{DIF} se correlacionaron con la EUR en 0.73, 0.70 y 0.71, respectivamente. El AFE se correlacionó con T_{md} en 0.83, y en consecuencia con el IAF ($R^2 = 0.67$) y el AF ($R^2 = 0.73$).

Cuadro 22. Correlaciones (R^2) entre variables derivadas de la temperatura del aire y parámetros y variables medidas en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

	$T_{mín}$	$T_{máx}$	T_{md}	T_{m24h}	T_{mn}	T_{osc}	T_{DIF}
<i>EUR</i>	0.42	0.73	0.60	0.55	0.05	0.70	0.71
<i>IAF</i>	0.19	0.00	0.19	0.30	0.67	-0.02	-0.10
<i>AFE</i>	0.43	0.15	0.37	0.50	0.83	0.10	0.05
F_r	0.21	-0.20	-0.22	-0.28	-0.34	-0.25	-0.10
F_t	0.21	0.87	0.82	0.80	0.38	0.88	0.80
F_h	-0.48	-0.89	-0.82	-0.77	-0.21	-0.86	-0.89
B_{sh}	-0.11	0.00	0.14	0.22	0.49	0.03	-0.07
B_{sr}	0.47	0.09	0.11	0.07	-0.08	0.03	0.18
B_{st}	0.16	0.75	0.74	0.75	0.44	0.76	0.69
B_{stot}	0.24	0.59	0.65	0.69	0.56	0.59	0.51
L_t	0.37	0.61	0.75	0.79	0.71	0.59	0.56
A_t	-0.11	-0.09	-0.04	0.11	0.43	-0.07	-0.25
L_r	0.57	-0.17	-0.04	-0.03	0.10	-0.26	-0.09
<i>AF</i>	0.20	0.10	0.30	0.41	0.73	0.08	0.01

$T_{mín}$ es la temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$), $T_{máx}$ es la temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$), T_{md} diurna es la temperatura media diurna ($^{\circ}\text{C}$), T_{m24h} es la temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$), T_{mn} es la temperatura media nocturna ($^{\circ}\text{C}$), T_{osc} es la oscilación térmica ($^{\circ}\text{C}$), T_{DIF} es la diferencia entre la temperatura media diurna y la temperatura media nocturna ($^{\circ}\text{C}$), *EUR* es la eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética (g MJ^{-1}), *IAF* es el índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), *AFE* es el área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), F_r , F_t , F_h , son fracciones de fotosintatos enviados a raíz, tallo y hoja, respectivamente; B_{sh} , B_{sr} y B_{st} son la biomasa seca de hoja, raíz y total, respectivamente; L_t es longitud del tallo (cm), A_t es ancho del tallo, L_r es longitud de raíz, y *AF* es área foliar ($\text{cm}^2 \text{planta}^{-1}$).

6.13. Modelo de crecimiento de la plántula de tomate

6.13.1. Modelación de la repartición de asimilados

Se ajustó un modelo del comportamiento de F_h (%) en función del tiempo (Figura 6).

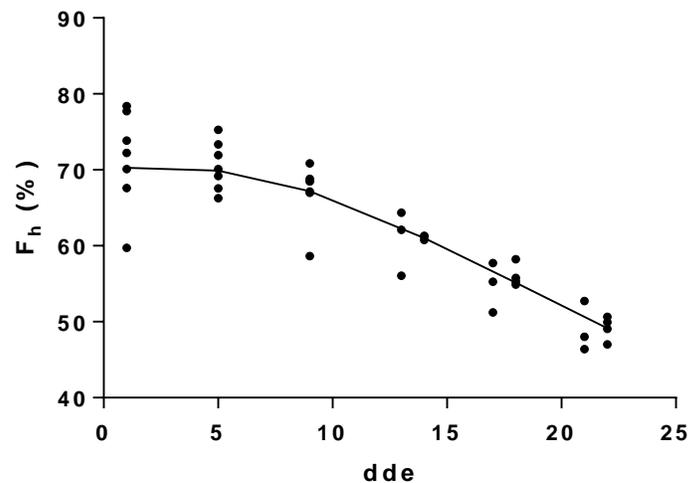


Figura 6. Modelo para la predicción del porcentaje de asimilados asignados a hoja (F_h (%)) en función de los días de cultivo (dde) (—). Porcentaje de asimilados asignados a hoja en 22 dde (●).

El modelo es la siguiente:

$$y = a - b * e^{(-c*x^d)}$$

donde:

$$a = 70.25;$$

$$b = 198.59;$$

$$c = 19.2;$$

$$d = -0.69;$$

x son días después de emergencia.

El modelo sobrestima el B_{stot} en los ambientes $T1$, $T2$, $T4$ y $T5$, mientras que subestima en el ambiente $T6$. Solo se obtiene buen ajuste en el $T3$ (Figura 7).

6.13.2. Nivel de ajuste del modelo propuesto

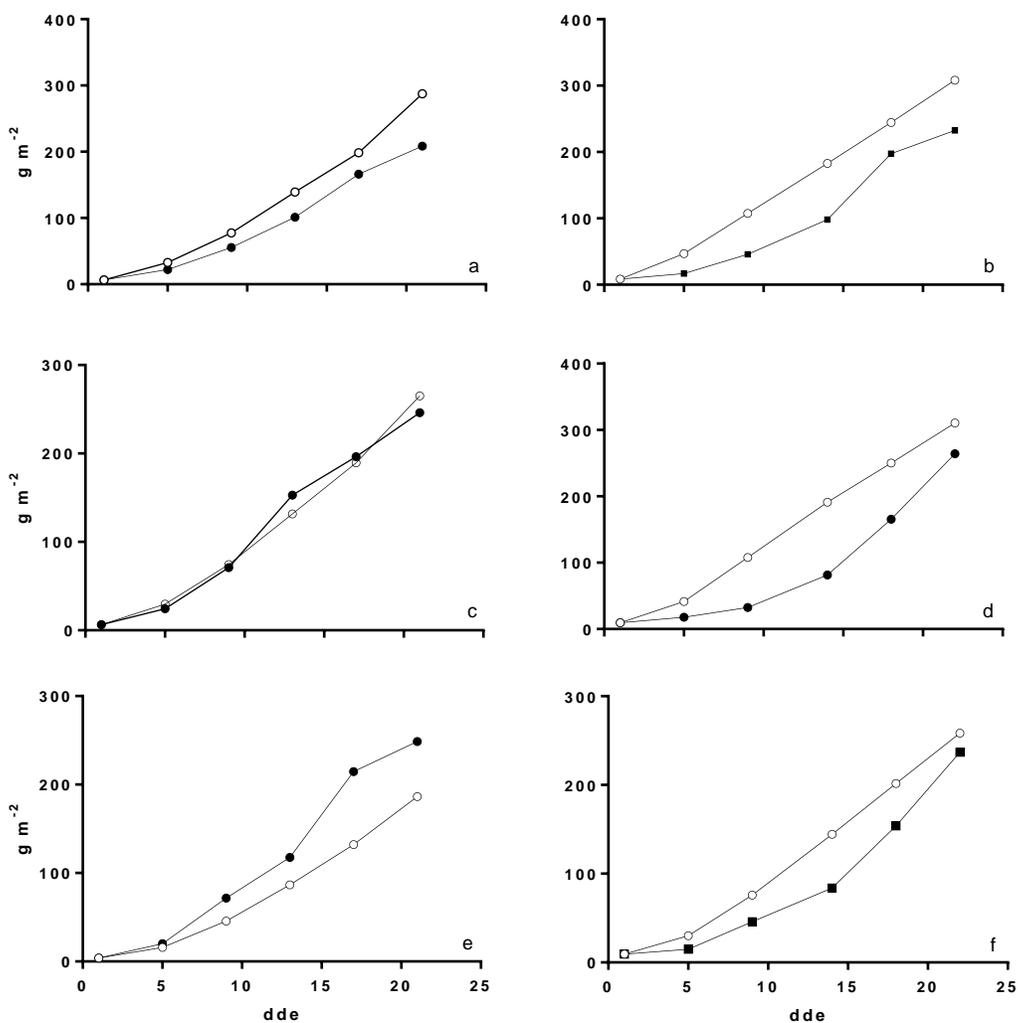


Figura 7. Biomasa total observada (●) y modelada (○) de plántulas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) de los tratamientos a) $T1$ (12-29 °C), b) $T2$ (14-31 °C), c) $T3$ (12-34 °C), d) $T4$ (13-34 °C), e) $T6$ (13-40 °C), f) $T5$ (13-38 °C), cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 ($F1$) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 ($F2$).

En forma global, el modelo sobreestima B_{stot} y B_{sh} , mientras que subestima B_{st} . En cambio, se tiene un mejor ajuste para B_{sr} . Tanto B_{stot} como psh modelados presentaron $R^2 = 0.82$, mientras que pst y B_{sr} presentaron $R^2 = 0.78$ (Figura 8).

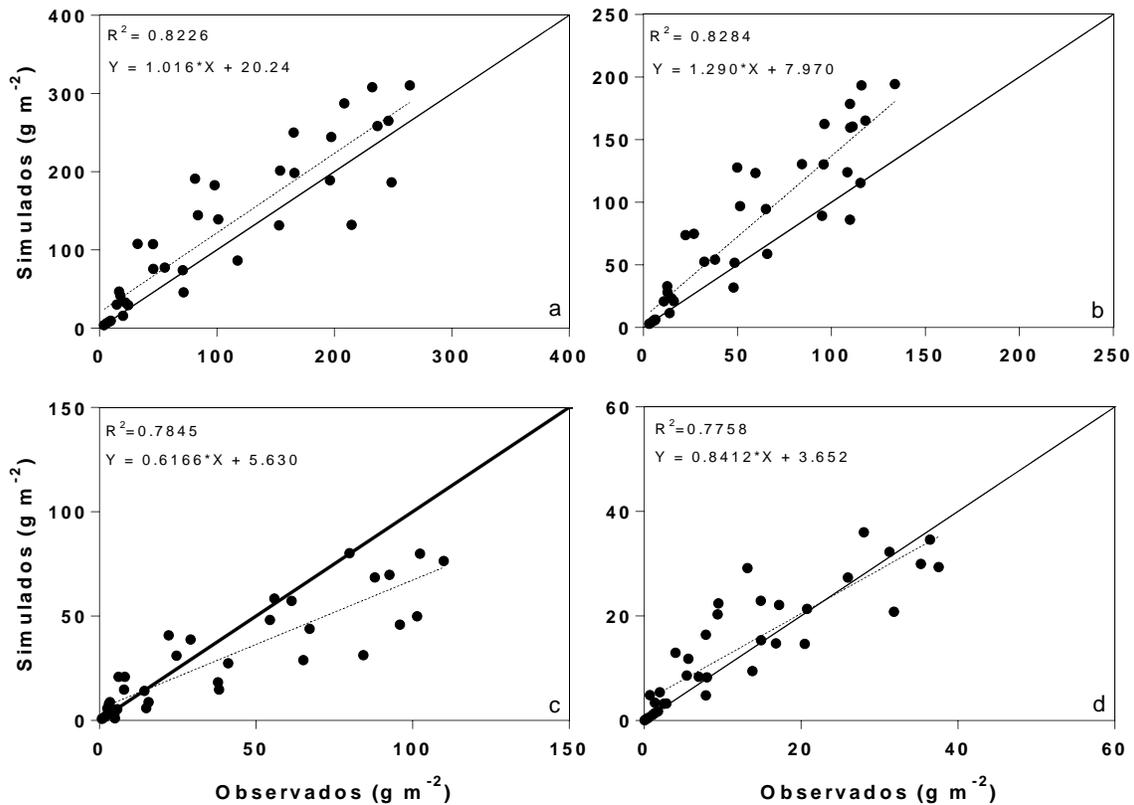


Figura 8. Precisión de un modelo mecanicista derivado del modelo SUCROS para calcular la producción de biomasa seca de a) B_{stot} , b) B_{sh} , c) B_{st} , y d) B_{sr} , de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) cultivadas en Texcoco, México, del 26 de junio al 16 de julio del 2017 (F1) y del 17 de agosto al 10 de septiembre del 2017 (F2). La línea continua representa el valor óptimo de ajuste entre modelado y observado, mientras que la línea punteada representa la regresión lineal entre datos observados y modelados.

El error promedio de los tratamientos para las variables respuesta fue superior a 50 %, excepto para el B_{stot} que fue de 46 %. El tratamiento con el menor porcentaje de error fue el T3 (promedio de 12 %) mientras que los tratamientos T2 y T4

presentaron los mayores porcentajes de error (promedios mayores a 89 %) (cuadro 23).

Cuadro 23. Porcentaje de error total y por tratamiento del modelo propuesto para las variables B_{sh} , B_{st} , B_{sr} y B_{stot} medidas en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	Error (%)			
	psh	pst	psr	pstot
T1	40.41	56.18	11.65	30.20
T2	93.10	59.60	129.10	75.96
T3	16.12	16.60	10.05	8.56
T4	103.10	85.99	113.35	94.39
T5	56.76	45.20	65.38	46.78
T6	13.76	41.19	22.70	24.41
Error total	53.88	50.79	58.71	46.72

Error = error medio en porcentaje, para un número de 6 observaciones por tratamiento y 36 observaciones para el total.

VII. DISCUSION GENERAL

La correlación más alta entre las variables derivadas de la temperatura del aire y los parámetros calculados fue entre la temperatura máxima del aire ($T_{m\acute{a}x}$) y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR), aunque no se observaron diferencias significativas en la EUR . Esta correlación positiva no concuerda con (Zhang *et al.*, 2006) ni con Camejo *et al.* (2005) quienes indican que las altas temperaturas pueden llegar a reducir la producción de asimilados debido a la pérdida de estabilidad de las membranas, la modificación del flujo de electrones, reducción en la asimilación de CO_2 , el funcionamiento del PSII y el contenido de pigmentos (carotenoides y clorofilas). Esto indica que la $T_{m\acute{a}x}$ en el rango evaluado en nuestra investigación (29 a 40 °C) no disminuyó la EUR , por lo que la variedad de tomate tipo saladette DRD 8551 puede tolerar temperaturas máximas de hasta 40 °C. Cabe

mencionar que se desconoce el tiempo en el que la plántula de tomate puede sobrevivir a altas temperaturas debido a daño térmico. Aunque las variables oscilación termica (T_{osc}) y la diferencia entre temperatura media diurna y la temperatura media nocturna (T_{DIF}) presentaron alta correlación con EUR , éstas se calculan a partir de la diferencia entre la temperatura nocturna y diurna; aunque el efecto mayor en esas variables es por la temperatura diurna, ya que las diferencias de temperatura nocturna entre tratamientos fue insignificante. El área foliar específica (AFE) solo presentó mayor correlación con la temperatura media nocturna (T_{mn}). Esto contrasta con lo reportado por Heuvelink (2005) quien afirma que el AFE responde a la T_{md} y al T_{DIF} .

En cuanto a la repartición de asimilados en la planta, aunque se observaron diferencias estadísticamente significativas en la fracción de fotoasimilados asignados a raíz (F_r) por efecto de los tratamientos, ésta no se correlacionó con $T_{máx}$ ni con las otras variable derivada de la temperatura del aire, debido a que la temperatura del suelo es la que tiene mayor efecto en el crecimiento de raíz (Huang *et al.* 2012). En cambio, la fracción de fotoasimilados asignados a tallo (f_t) se correlacionó con la la temperatura máxima del aire ($T_{máx}$), la temperatura media diurna (T_{md}), temperatura media en 24 h (T_{m24h}), oscilcion termica (T_{osc}) y la diferencia entre temperatura media diurna y la teepratura media nocturna (T_{DIF}), similar a lo reportado por Poorter *et al.* (2012) quienes afirman que la temperatura tiene influencia en la fracción de biomasa asignada a tallo. En cambio, la fracción de fotoasimilados asignados a hoja (F_h) se correlacionó negativamente con las mismas variables derivadas de la temperatura con las que se correlacionó la fracción de fotoasimilados asignados a tallo (F_t). Este comportamiento inverso entre F_t y F_h fue mencionado por (Marcelis, 1991) quien reporta que bajo condiciones de poca luz y alta densidad de plantas la relación tallo:hoja aumenta a medida que aumenta la temperatura.

Sin duda la acumulación de biomasa en tallo (B_{st}) es consecuencia de la repartición de asimilados. En este sentido, B_{st} se correlaciona con las mismas

variables derivadas de la temperatura del aire que F_t . En cambio, la biomasa acumulada en raíz (B_{sr}) y la biomasa acumulada en hoja (B_{sh}) no se correlacionan con ninguna variable derivada de la temperatura del aire.

La B_{st} está relacionada directamente con la longitud del tallo (L_t), y a su vez, L_t se correlaciona con T_{md} , T_{m24h} y T_{mn} , pero no con $T_{m\acute{a}x}$. El aumento en la tasa de elongación del tallo conforme aumenta la temperatura ha sido reportado desde hace varias décadas (Calvert, 1964), así como la influencia de las temperaturas nocturnas en la disminución de la tasa de elongación del tallo (Kristoffersen, 1963). Además, ambientes con menor radiación solar también pueden aumentar la tasa de elongación del tallo (Hurd y Thornley, 1974).

El área foliar (AF) no presentó correlación con $T_{m\acute{a}x}$, no obstante, se observó correlación con la T_{mn} . Otros autores han encontrado con anterioridad una relación entre el AF y la T_{mn} (el Rahman *et al.*, 1959). Además, es conocido que condiciones de nivel bajo de iluminación y alta temperatura aumentan la tasa de expansión del área foliar (Verkerk, 1955).

El área foliar específica (AFE) fue diferente entre tratamientos y se correlacionó positivamente con la T_{mn} . Este parámetro no se relaciona con B_{sh} , sino más bien con la expansión de la hoja (AF), la cual a su vez se encuentra en función de la T_{mn} . Autores como (Goudriaan y Van Laar, 2012) también consideran que AFE es un parámetro. Sin embargo, en el modelo TOMGRO, AFE se calcula a partir de interacción entre la T_{m24h} , la integral diaria de flujo fotónico y el nivel de CO_2 ambiental (Jones, Dayan *et al.*, 1991).

En general, $T_{m\acute{a}x}$ y otras variables derivadas de la temperatura del aire afectaron F_t , F_h y B_{st} , pero $T_{m\acute{a}x}$ no presentó correlación alta con L_t ni con AF . No obstante, las diferencias estadísticamente significativas presentes en cada tratamiento se deben al efecto de las otras variables derivadas de la temperatura, y al nivel de sombra causado por el área foliar, ya que las plántulas presentaron síntomas de

etiolación en las dos fechas de cultivo. Autores como (Poorter, Niklas *et al.*, 2012) reportan que niveles bajos de irradiancia y alta densidad de plantas modifican la repartición de asimilados entre la parte aérea y raíz debido a cambios en la proporción de rojo:rojo lejano. Aunque es importante señalar que también se presentaron cambios en la relación hoja:tallo. En nuestra investigación no se aplicaron tratamientos con diversos niveles de radiación solar; por lo que en la fase experimental, la temperatura juega un papel importante en las variables de crecimiento, aún bajo condiciones similares de radiación solar que favorecieron la etiolación de los tallos de las plántulas de tomate.

El modelo propuesto presentó un coeficiente de determinación de 0.82 en la modelación de la biomasa seca total, y sobrestimó 20.2 g por cada unidad de materia seca observada. Esto puede deberse a que se usaron parámetros extraídos de la literatura; como el punto de compensación por CO₂, conductancia del mesófilo y máxima capacidad fotosintética en el cálculo de la producción de fotoasimilados propuesto por Goudriaan (2012), y no se procedió a calibrarlos con base en el ambiente y genotipo estudiados. Además, nuestro modelo consideró el área foliar específica y la fracción de asimilados enviados al tallo como parámetros en vez de ser dependientes de la temperatura del aire como se determinó experimentalmente.

El error entre la biomasa seca total modelada y observada debido a la incertidumbre en el cálculo del AFE y la repartición de asimilados se puede observar al analizar el comportamiento que tuvo el modelo al predecir la biomasa en hojas y tallo. Ya que las modificaciones que se presentan en B_{sh} (simulados) se comportan de manera antagónica con los resultados de B_{st} (simulados), lo que nos sugiere una falta de precisión en la asignación de asimilados en la parte aérea de la planta (tallo/hojas). Estas dos variables son afectadas por AFE ($m^2 g^{-1}$) la cual depende del AF , por lo que, en la modelación AFE afecta el AF y la cantidad de radiación absorbida interceptada para el cálculo de la producción de fotoasimilados. Esto concuerda con lo reportado por Heuvelink (2005), quien afirma que la expansión

foliar juega un papel importante en la intercepción de radiación solar y la tasa de fotosíntesis.

Autores como Marcelis *et al.* (1998) consideran que la mejor forma de modelar la asignación de biomasa a las diferentes estructuras vegetales es por medio de alometría descriptiva, equilibrio funcional o la regulación de la demanda. Bertin (1993) sugiere que la temperatura, radiación solar y la concentración de CO₂, pueden ser usados para modelar el *AFE*.

Dado que existe una relación entre la repartición de asimilados en hoja y en tallo sería conveniente incluir en el modelo la relación entre la longitud de tallo y la biomasa de tallo, variable o parámetro conocido como longitud específica de tallo (cm¹ g⁻¹ m⁻²), ya que esto nos permitiría establecer una relación entre variables morfológicas (longitud de tallo y área foliar) y de crecimiento (biomasa seca de hoja y de tallo) en función de la temperatura.

VIII. CONCLUSIONES

Las temperaturas máximas en el rango de 29 a 40 °C solo afectaron el crecimiento del tallo de plántulas de tomate tipo saladette DRD 8551; se correlacionaron con la eficiencia en el uso de la radiación y la fracción de fotosintatos enviados al tallo mientras que el efecto fue inverso en la fracción de fotosintatos enviados a la hoja, por lo que la temperatura del aire afectó el porcentaje de repartición de asimilados. La longitud del tallo cambió por efecto de la temperatura media diaria y la temperatura media nocturna del aire. También el área foliar fue afectado por la temperatura media nocturna. El área foliar específica fue afectado por la temperatura media nocturna resultado de la expansión foliar más que por la acumulación de biomasa en las hojas, mientras que la temperatura del aire no tuvo efecto la fracción de fotosintatos enviados a la raíz ni al coeficiente de extinción.

El modelo de crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate presentó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.82$ en la modelación de la biomasa seca total, y sobrestimó 20.2 g por cada unidad de materia seca observada. El error medio en porcentaje (46.72 %) entre la biomasa seca total modelada y observada se debió a que se consideró el *AFE* y la repartición de asimilados como parámetros, cuando fueron afectados por la temperatura máxima.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Acock, B., D. Charles-Edwards, et al. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *Journal of Experimental Botany* 29: 815-827.
- Alberts, B., A. Johnson, et al. 2010. *Biología molecular da célula (Meree Durforl i Call y Miquel Llobera i Sande, trad.)*.3a. ed. Ediciones Omega, S.A., España: 1274 p.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart, et al. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research* 32: 17-25.
- Atlas Agroalimentario, S. 2017. Atlas agroalimentario del servicio de información agroalimentaria y pesquera. México, DF: 94-95.
- Azcón-Bieto, J. and M. Talón. 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2a. ed. McGRAW-HILL, España. 369 p.
- Baehr, H. D., S. G. Pecci, et al. 1965. *Tratado moderno de termodinámica:(teoría y aplicaciones técnicas)*, (Sebastián Gumá Pecci, trad). José Montesó, España. 509 p.
- Balaguera, H. E., J. G. Á. Herrera, et al. 2008. Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana* 26: 246-255.
- Ballaré, C. L., A. L. Scopel, et al. 1995. Plant photomorphogenesis in canopies, crop growth, and yield. *HortScience* 30: 1172-1181.

- Beléndez, A. 2015. James clerk maxwell, the man who changed the world forever II. International Year of Light Blog. 6 p.
- Bell, M., G. Wright, et al. 1992. Night temperature affects radiation-use efficiency in peanut. *Crop Science* 32: 1329-1335.
- Berrospe, O. E. A. 2010. Sustratos alternativos a base de cachaza para la producción de plántulas de tomate (*lycopersicum esculentum* mill.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados-Edafología. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 139 p
- Berry, J. and O. Bjorkman. 1980. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annual Review of plant physiology* 31: 491-543.
- Bertin, N. and E. Heuvelink. 1993. Dry-matter production in a tomato crop: Comparison of two simulation models. *Journal of Horticultural Science* 68: 995-1011.
- Bidwell, R. 1979. Fisiología vegetal (Cano Guadalupe Geronimo y Garcidueñas Manuel). 1ª. Edición. AGT Editor, SA México DF. 762 p.
- Bitá, C. and T. Gerats. 2013. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in plant science* 4: 273.
- Blackman, F. F. 1905. Optima and limiting factors. *Annals of Botany* 19: 281-295.
- Bouman, B., H. Van Keulen, et al. 1996. The 'school of de wit' crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural systems* 52: 171-198.
- Brooks, A. and G. Farquhar. 1985. Effect of temperature on the co₂/o₂ specificity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light. *Planta* 165: 397-406.
- Calvert, A. 1964. The effects of air temperature on growth of young tomato plants in natural light conditions. *Journal of horticultural science* 39: 194-211.

- Camejo, D., P. Rodríguez, et al. 2005. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. *Journal of plant physiology* 162: 281-289.
- Castillo, M. C. C. and M. A. Jordán. 1999. *Meteorología y clima*. 1a, ed. Universidad Politecnica de Catalunya, España. 159 p.
- Castorena, M. V., E. A. C. Valencia, et al. 2005. Manejo de la fertilización en plántulas de tomate para trasplante. III. Agrofaz, Universidad Juearez, Mexico: 1-4.
- Cavero, J., R. Plant, et al. 1998. Application of epic model to nitrogen cycling in irrigated processing tomatoes under different management systems. *Agricultural systems* 56: 391-414.
- Cengel, Y. A., M. A. Boles, et al. 2003. *Termodinámica* (González Virgilio y Sarmiento Sergio, trad). 6a. ed. McGRAW-HILL, Mexico. 995 p.
- Cerny, T. A., N. C. Rajapakse, et al. 2004. Height control of vegetable seedlings by greenhouse light manipulation. *Journal of vegetable crop production* 10: 67-80.
- CONAGUA. 2018. Información climatológica por estado. "Published on the Internet:" <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>. 2018.
- CONSULMEX. 2015. México: Primer exportador mundial de tomate. "Published on the Internet:" <http://consulmex.sre.gob.mx/omaha/images/JITOMATE/jitomate.pdf>. 2015.
- Curtis, H. and A. Schnek. 2008. *Curtis. Biología*. 7a, Ed. Médica Panamericana. Mexico. 991 p.
- Chang, R. and J. Overby. 2000. *General chemistry: The essential concepts*. 6a. ed. Mc Graw Hill, Companies. 777 p.
- Chen, D., R. Shi, et al. 2018. Predicting plant biomass accumulation from image-derived parameters. *GigaScience, Germany* 7: 1-13.

- Darnell, J. E., H. Lodish, et al. 1986. Molecular cell biology (Editoria Medica Panamerica S.A. trad). 5a, ed. Panamerica, Mexico. 935 p.
- De Candolle, A. 1885. Origin of cultivated plants. D. Appleton, USA. 468 p.
- De Pascale, S., A. Maggio, et al. 2015. Growth response and radiation use efficiency in tomato exposed to short-term and long-term salinized soils. *Scientia Horticulturae* 189: 139-149.
- De Robertis, E. D. P., E. M. De Robertis, et al. 1982. Fundamentos de biología celular y molecular. 4a. ed. El Ateneo, Argentina. 444 p.
- el Rahman, A. A., J. F. Bierhuizen, et al. 1959. Growth and transpiration of tomato in relation to night temperature under controlled conditions. *H. Veenman., Nederland* 59 (4): 1-6.
- Elia, A. and G. Conversa. 2012. Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input. *European Journal of Agronomy* 40: 64-74.
- Enriquez-Reyes, S. A., G. Alcántar-González, et al. 2003. Nutrición mineral acoplada al crecimiento (numac): Nutrición con n para tomate en invernadero 1. Descripción del modelo y obtención de parámetros. *Terra Latinoamericana* 21: 167-175.
- Escobar, V. H. y R. Lee. 1994. Manual de producción de tomate bajo invernadero. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia. 164 p.
- Espinosa, Z. C. 2004. Producción de tomate en invernadero. Memorias del IV Simposio Nac. de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Coahuila. México. pp. 19-43.
- Faires, V. M. 1965. Termodinámica(Escobar Jose y Garcia Dolores., trad). 6a. Ed. Union Tipografica Editorial Hispano-Americana. S. A. de C. V., Mexico. 655 p.
- Falcone, D. L., J. P. Ogas, et al. 2004. Regulation of membrane fatty acid composition by temperature in mutants of arabidopsis with alterations in membrane lipid composition. *BMC Plant Biology* 4: 17.
- FAO. 2002. On-line crop production statistics. "Published on the Internet:" <http://apps.fao.org/>.

- Feng, B., P. Liu, et al. 2014. Effect of heat stress on the photosynthetic characteristics in flag leaves at the grain- filling stage of different heat-resistant winter wheat varieties. *Journal of agronomy and crop science* 200: 143-155.
- FIRA. 2016. Tomate rojo 2016. Panorama agroalimentario, Mexico. 33 p.
- FND. 2014. Panorama del jitomate. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal, y Pesquero "Publicado en internet:" <http://www.financierarural.gob.mx/informacionsectorrural/Panoramas/Ficha%20Jitomate.pdf>. 2016.
- Franklin, K. A. 2009. Light and temperature signal crosstalk in plant development. *Current opinion in plant biology* 12: 63-68.
- Goudriaan, J. and H. Van Laar. 2012. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Vol. 2. Springer Science & Business Media, Nederland. 233 p.
- Gould, W. A. 2013. Tomato production, processing and technology. 3a. ed. Elsevier, USA. 531 p.
- Haefner, J. W. 2012. Modeling biological systems: Principles and applications. Springer Science & Business Media. CAB International, USA. 309 p.
- Hansen, L., M. Afzal, et al. 1994. High-and low-temperature limits to growth of tomato cells. *Planta* 195: 1-9.
- Havaux, M. 1996. Short-term responses of photosystem i to heat stress. *Photosynthesis Research* 47: 85-97.
- Hazra, P., H. Samsul, et al. 2007. Breeding tomato (*lycopersicon esculentum* mill) resistant to high temperature stress. *Int J Plant Breed* 1: 31-40.
- Hernández, N., F. Soto, et al. 2009. Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales, Cuba* 30: 73-82.
- Heuvelink, E. 1989. Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae* 38: 11-22.

- Heuvelink, E. 1995a. Dry matter production in a tomato crop: Measurements and simulation. *Annals of botany* 75: 369-379.
- Heuvelink, E. 1995b. Effect of temperature on biomass allocation in tomato (*lycopersicon esculentum*). *Physiologia Plantarum* 94: 447-452.
- Heuvelink, E. 1996. Tomato growth and yield: Quantitative analysis and synthesis. Heuvelink. 319 p.
- Heuvelink, E. 2005. Tomatoes. CABI, Wageningen University, Netherlands. 325 p.
- Hewitt, P. G. 2002. Física conceptual. 10a. ed. Pearson Educación, México. 781 p.
- Holaday, A. S., W. Martindale, et al. 1992. Changes in activities of enzymes of carbon metabolism in leaves during exposure of plants to low temperature. *Plant Physiology* 98: 1105-1114.
- Howell, J. R., R. O. Buckius, et al. 1990. Principios de termodinámica para ingeniería (Velasco Ileana, trad). McGraw-Hill, México. 574 p.
- Huang, B., S. Rachmilevitch, et al. 2012. Root carbon and protein metabolism associated with heat tolerance. *Journal of experimental botany* 63: 3455-3465.
- Hurd, R. and J. Thornley. 1974. An analysis of the growth of young tomato plants in water culture at different light integrals and co2 concentrations: I. Physiological aspects. *Annals of Botany* 38: 375-388.
- Hussey, G. 1963. Growth and development in the young tomato: I. The effect of temperature and light intensity on growth of the shoot apex and leaf primordia. *Journal of Experimental Botany* 14: 316-325.
- Hussey, G. 1965. Growth and development in the young tomato: Iii. The effect of night and day temperatures on vegetative growth. *Journal of Experimental Botany* 16: 373-385.
- Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press, Canada. 392 p.

- Jaramillo, A. 2005. Clima andino y café en Colombia. CO-BAC, Bogotá, Colombia 21237. 20 p.
- Jenkins, J. 1948. The origin of the cultivated tomato. *Economic Botany* 2: 379-392.
- Jones, J., E. Dayan, et al. 1988. Modeling tomato growth for optimizing greenhouse temperatures and carbon dioxide concentrations. *International Symposium on Models for Plant Growth, Environmental Control and Farm Management in Protected Cultivation* 248. pp. 285-294.
- Jones, J. W., J. M. Antle, et al. 2016. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, Elsevier. 204-254 p.
- Jones, J. W., E. Dayan, et al. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (tomgro). *Transactions of the ASAE* 34: 663-0672.
- Kasperbauer, M. J. and K. Kaul. 1996. Light quantity and quality effects on source-sink relationships during plant growth and development. *Photoassimilate Distribution in Plants and Crops Source-Sink Relationships*, USA 48. 421.
- Katsoulas, N., K. Peponakis, et al. 2015. Calibration of a growth model for tomato seedlings (tomseed) based on heuristic optimisation. *biosystems engineering* 140: 34-47.
- Kozai, T. 2016. Why led lighting for urban agriculture? Led lighting for urban agriculture. Springer. pp. 3-18.
- Krapovickas, A. 2010. La domesticación y el origen de la agricultura. *Bonplandia*: 193-199.
- Kristoffersen, T. 1963. Interactions of photoperiod and temperature in growth and development of young tomato plants (*lycopersicon esculentum* mill.). *Physiologia plantarum; Supplementum* 16: 1-98.
- Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: A review. *Scientia horticulturae* 74: 151-174.
- Leskovar, D. I. 2001. Producción y ecofisiología del transplante hortícola. Texas A y University, USA. 18 p.

- Linares, O. 2004. El cultivo de tomate en invernadero. Manual del participante. Secretaria de la Reforma Agraria. PROCEDE "fondo de tierra e instalación del joven emprendedor" México.
- López-Cruz, I., A. Ramírez-Arias, et al. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: Trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. Revista Chapingo. Serie Horticultura 11: 257-267.
- López-Cruz, I. L., A. Rojano-Aguilar, et al. 2014. Análisis de sensibilidad global del modelo de cultivos sucros aplicado a tomate de cáscara. Revista fitotecnia mexicana 37: 279-288.
- López, I. Z. and E. C. del Arco. 2010. Meteorología y climatología. Editorial UNED, España. 247 p.
- Ma, L., T. A. Howell, et al. 2016. Agricultural system models in field research and technology transfer. CRC press, USA. 351 p.
- Maass, M. 2003. Principios generales sobre manejo de ecosistemas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, Campus Morelia, México. 17 p.
- Manrique, L. and T. Hodges. 1989. Estimation of tuber initiation in potatoes grown in tropical environments based on different methods of computing thermal time. American Potato Journal 66: 425-436.
- Marcelis, L. 1991. Simulation of biomass allocation in greenhouse crops-a review. International Workshop on Greenhouse Crop Models 328. pp. 49-68.
- Marcelis, L., A. Elings, et al. 2008. Simulating growth and development of tomato crop. International Symposium on Tomato in the Tropics 821: 101-110.
- Marcelis, L., E. Heuvelink, et al. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: A review. Scientia Horticulturae 74: 83-111.
- Mingo, D. M., J. C. Theobald, et al. 2004. Biomass allocation in tomato (*lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: Enhancement of root growth. Functional Plant Biology 31: 971-978.
- Muller, C. H. 1940. A revision of the genus *lycopersicon*. US Department of Agriculture, USA 382. 39 p.

- Noordegraaf, C. V. 1992. Production and marketing of high quality plants. International Workshop on Floriculture & Nursery Industries and Environment 353: 134-148.
- Nuez, F. 1995. El cultivo del tomate. Mundi-Prensa. Madrid, España. 793 p.
- Papadopoulos, A. and S. Pararajasingham. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*lycopersicon esculentum* mill.): A review. *Scientia Horticulturae* 69: 1-29.
- Papadopoulos, A. P. 1991. Growing greenhouse tomatoes in soil and in soilless media. Available from Communications Branch, Agriculture Canada.
- Papadopoulos, A. P. and D. P. Ormrod. 1988. Plant spacing effects on light interception by greenhouse tomatoes. *Canadian Journal of Plant Science* 68: 1197-1208.
- Parra-Terraza, S., E. Salas-Núñez, et al. 2010. Relaciones nitrato/amonio/urea y concentraciones de potasio en la producción de plántulas de tomate. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 16: 37-47.
- Peat, W. 1970. Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato. *Annals of Botany* 34: 319-328.
- Pinter, J. P. J., J. C. Ritchie, et al. 2003. The agricultural research service's remote sensing program. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69: 615-618.
- Poorter, H., K. J. Niklas, et al. 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta- analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist* 193: 30-50.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramirez, A., F. Rodríguez, et al. 2003. Calibration and validation of complex and simplified tomato growth models for control purposes in the southeast of Spain. International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production 654: 147-154.

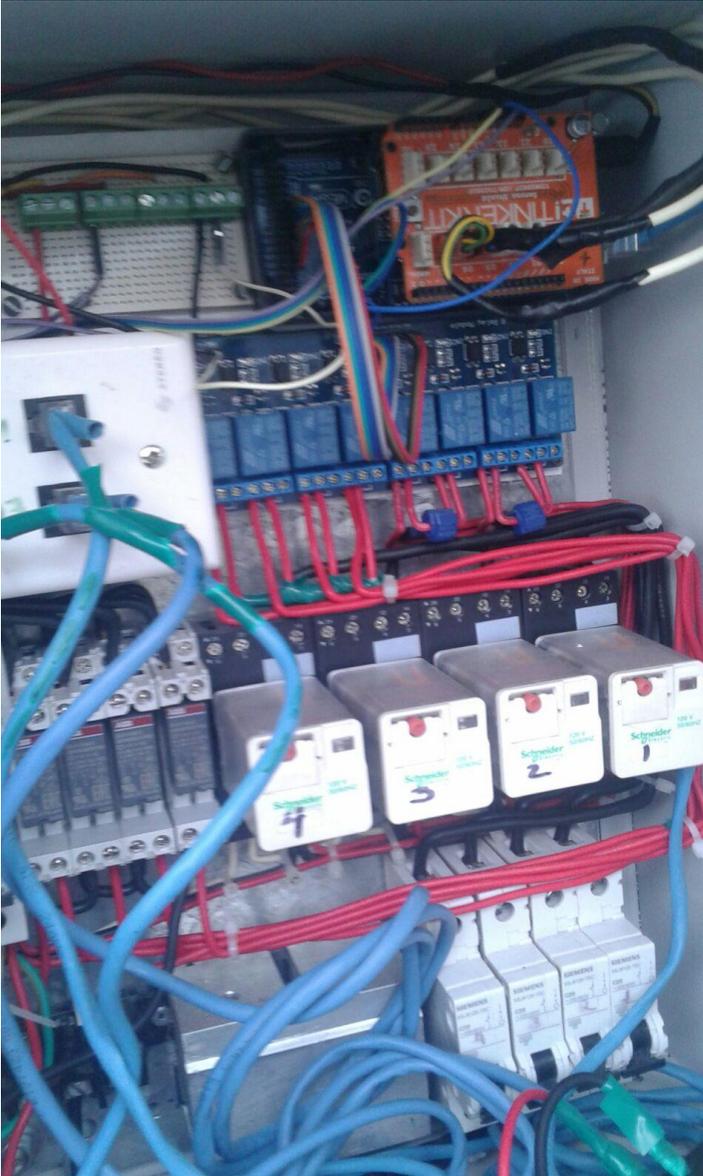
- Razdan, M. K. and A. K. Mattoo. 2006. Genetic improvement of solanaceous crops: Tomato. CRC Press.
- Richter, G. 1972. Fisiología del metabolismo de las plantas (Dr. Ludwig Muller, trad). Continental, S.A. México. 401 p.
- Ríos-Osorio, O., J. L. Chávez-Servia, et al. 2014. Producción tradicional y diversidad de tomate (*solanum lycopersicum* L.) nativo: Un estudio de caso en tehuantepec-juchitán, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo* 11: 35-51.
- Ritchie, J. 1985. Description and performance of cereals wheat: A user-oriented wheat yield model. *ARS wheat yield project*: 159-175.
- Rodríguez, O. J. C. 1998. Efecto del nitrógeno, fósforo y potasio en el crecimiento y producción de plántulas de tomate (*lycopersicum esculentum* Mill) var. Floradade. Universidad Autónoma de Nuevo León, Mexico. 87 p.
- Rojas-Lara, P., M. Pérez-Grajales, et al. 2008. Modelos matemáticos para estimar el crecimiento del fruto de chile manzano (*capsicum pubescens* R y P). *Revista Chapingo. Serie horticultura* 14: 289-294.
- Rosenda, P. 1997. *Biología 1* editorial Santillana. México. 328 p.
- Salazar, M. 2006. Un modelo simple de producción potencial de uchuva (*physalis peruviana* L.). Trabajo de grado, Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados, Universidad Nacional de Colombia.
- Salvucci, M. E. and S. J. Crafts-Brandner. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress: The activation state of rubisco as a limiting factor in photosynthesis. *Physiologia plantarum* 120: 179-186.
- Sands, P. 1996. Modelling canopy production. lii. Canopy light-utilisation efficiency and its sensitivity to physiological and environmental variables. *Functional Plant Biology* 23: 103-114.
- Santiago, J., M. Mendoza, et al. 1998. Evaluación de tomate (*lycopersicon esculentum*, Mill) en invernadero: Criterios fenológicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana* 9: 59-65.

- Schneider, C. A.; Rasband, W. S. & Eliceiri, K. W. (2012), "[NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis](#)", *Nature methods* **9(7)**: 671-675, [PMID 22930834](#) ([on Google Scholar](#)).
- Scholberg, J., B. L. McNeal, et al. 2000. Growth and canopy characteristics of field-grown tomato. *Agronomy Journal* 92: 152-159.
- Smith, V. N. 1997. Abbott. Introducción a la termodinámica en ingeniería química. 6a. ed. Mc Graw Hill, México.
- Soltani, A. 2012. Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI. USA. 309 p.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2010. Fisiología vegetal. Oceano, España. 1784 p.
- Thornley, J. H. and I. R. Johnson. 1990. A mathematical approach to plant and crop physiology. A mathematical approach to plant and crop physiology. Oxford, Clarendon, UK. 74 p.
- van Dam, B., M. d. Goffau, et al. 2005. Cultivation of tomato: Production, processing and marketing. Agromisa Foundation and CTA, Wageningen, Netherlands. 91 p.
- Verkerk, K. 1955. Temperature, light and the tomato. Veenman, Netherlands. 50 p.
- Vibrans, H. 2005. Malezas de México. "Publicado en internet:" <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/solanaceae/lycopersicon-esculentum/fichas/ficha.htm#8>. 2016.
- Villegas, T. O. G., M. M. d. I. N. Rodríguez, et al. 2001. Potencial de la miel de abeja en la nutrición de plántulas de tomate. *Terra Latinoamericana*, México. 19: 97-102.
- Vries, F. P. d. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. *Int. Rice Res. Inst.*, Netherlands. 227 p.
- Wahid, A. 2007. Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (*saccharum officinarum*) sprouts. *Journal of plant Research* 120: 219-228.

- Went, F. 1944a. Plant growth under controlled conditions. III. Correlation between various physiological processes and growth in the tomato plant. *American Journal of Botany*: 597-618.
- Went, F. W. 1944b. Plant growth under controlled conditions. II. Thermoperiodicity in growth and fruiting of the tomato. *American Journal of Botany*: 135-150.
- Went, F. 1945. Plant growth under controlled conditions. V. The relation between age, light, variety and thermoperiodicity of tomatoes. *American Journal of Botany*: 469-479.
- Wien, H. C. 1997. *The physiology of vegetable crops*. Cab International, Wallingford, USA. 662 p.
- Yamori, W., K. Hikosaka, et al. 2014. Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis research* 119: 101-117.
- Zhang, Y., M. Mian, et al. 2006. Recent molecular and genomic studies on stress tolerance of forage and turf grasses. *Crop Science* 46: 497-511.

X. ANEXO

10.1. Fotografía del circuito del sistema de control.



10.2. Código para PIC programable ARDUINO MEGA®

```
#include "DHT.h" //Añadimos la libreria con la cual trabaja nuestro sensor

#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 // El sensor que vas a emplear. En este caso usamos el DHT11

#define HT1 9 // 00 de shield y pin 11 arduino
#define HT2 6 // 01 de shield y pin 10 arduino
#define HT3 5 // 02 de shield y pin 9 arduino
#define HT4 3 // 03 de shield y pin 6 arduino

DHT dht1 (HT1, DHTTYPE); //Indica el pin con el que trabajamos y el tipo de sensor
DHT dht2 (HT2, DHTTYPE);
DHT dht3 (HT3, DHTTYPE);
DHT dht4 (HT4, DHTTYPE);

#include <Wire.h>
#include <RTC.h>

RTC rtc(DST_ON); // OR DST_OFF

#include <Ethernet.h>
#include <SPI.h>
#include <UbidotsEthernet.h>

#define ID1 "5939fef57625426ab49053f8" //"Sensor 1 Temperatura"
#define ID2 "5939ff027625426ab49054c4" //"Sensor 1 Humedad"
#define ID3 "5939ff127625426ab6a8a06d" //"Sensor 2 Temperatura"
#define ID4 "5939ff177625426ab7fd5bf9" //"Sensor 2 Humedad"
#define ID5 "5939ff267625426ab6a8alac" //"Sensor 3 Temperatura"
#define ID6 "5939ff337625426ab6a8a281" //"Sensor 3 Humedad"
#define ID7 "5939ff3d7625426ab5055025" //"Sensor 4 Temperatura"
#define ID8 "5939ff477625426ab7fd5f0d" //"Sensor 4 Humedad"
#define ID9 "5939ff737625426ab6a8a68e" //"Hora RTC"
#define ID10 "5939ff7e7625426ab505545d" //"Seno 1"
#define ID11 "5939ff867625426ab7fd635a" //"Seno 2"
#define ID12 "5939ff907625426ab5055597" //"Seno 3"
#define ID13 "5939ff9a7625426ab7fd6485" //"Seno 4"
#define ID14 "593aa4cd7625424ab3d2529f" //"Calefaccion Tunel 1"
#define ID15 "593c2eba762542643182c5c5" //"Calefaccion Tunel 2"
#define ID16 "593c2efa762542642ec42ffb" //"Calefaccion Tunel 3"
#define ID17 "593c2f7e762542642f5e241f" //"Calefaccion Tunel 4"
#define ID18 "593aa4c27625424ab7bfeb57" //"Ventilacion Tunel 1"
#define ID19 "593c2ed87625426432b860fa" //"Ventilacion Tunel 2"
#define ID20 "593c2f5d7625426430ecd108" //"Ventilacion Tunel 3"
#define ID21 "593c2f997625426430ecd5b0" //"Ventilacion Tunel 4"
```

```

#define TOKEN "xYRFI4kn7xFwUXNedFiKHv4cSF5Edu" // Put here your Ubidots TOKEN

// Enter a MAC address for your controller below.
byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED }; // Newer Ethernet shields have a MAC address printed on a sticker on the shield

IPAddress ip(10,1,17,31); // Set the static IP address to use if the DHCP fails to assign

//IPAddress ip(192,168,2,12);

Ubidots client(TOKEN);

int RELE1 = 30; //calienta
int RELE2 = 32; //calienta
int RELE3 = 34; //calienta
int RELE4 = 36; //calienta
int RELE5 = 38; //enfria
int RELE6 = 40; //enfria
int RELE7 = 42; //enfria
int RELE8 = 44; //enfria

int hrs, mins, seg, tiempo, hora, i;

void setup()
{
  pinMode(RELE1, OUTPUT);
  pinMode(RELE2, OUTPUT);
  pinMode(RELE3, OUTPUT);
  pinMode(RELE4, OUTPUT);
  pinMode(RELE5, OUTPUT);
  pinMode(RELE6, OUTPUT);
  pinMode(RELE7, OUTPUT);
  pinMode(RELE8, OUTPUT);

  digitalWrite(RELE1, HIGH);
  digitalWrite(RELE2, HIGH);
  digitalWrite(RELE3, HIGH);
  digitalWrite(RELE4, HIGH);
  digitalWrite(RELE5, HIGH);
  digitalWrite(RELE6, HIGH);
  digitalWrite(RELE7, HIGH);
  digitalWrite(RELE8, HIGH);

  //delay(5000);
}

```

```

Serial.begin(9600); // start the Ethernet connection:

if (Ethernet.begin(mac) == 0)
{
  Serial.println("Failed to configure Ethernet using DHCP"); // try to configure using IP address instead of DHCP:
  Ethernet.begin(mac, ip);
}

delay(5000);
// give the Ethernet shield a second to initialize:

////////////////////////////////////// AJUSTE RTC ////////////////////////////////////////

//////////////////////////////////////
// SET DATE AND TIME //
//////////////////////////////////////

//rtc.setDateTime( 2017, 06, 19, 16, 38, 00 ); // Year, Month, Day, Hour24H, Minutes and Seconds

////////////////////////////////////// FIN AJUSTE VOID RTC ////////////////////////////////////////

} /// FIN VOID SETUP

void loop()
{
  //////////////////////////////////////////////////// MANDA HORA A UBIDOTS ////////////////////////////////////////.
  Data d = rtc.getData();

  // GET DATE:
  Serial.print(d.year);   Serial.print("/");
  Serial.print(d.month);  Serial.print("/");
  Serial.print(d.day);    Serial.print(" ");

  // GET TIME:
  Serial.print(d.hour24h); Serial.print(":");
  Serial.print(d.minutes); Serial.print(":");
  Serial.println(d.seconds);

  delay(1000);

  hrs = d.hour24h;
  mins = d.minutes;
  delay(2000);

  hrs = hrs * 100;
  tiempo = hrs + mins;

  client.add(ID9, tiempo);
  client.sendAll();
  ////////////////////////////////////////

```

```

//////////////////////////////////// MANDA SENSORES A UBIDOTS //////////////////////////////////////
float h1 = dht1.readHumidity(); //Guarda la lectura de la humedad en la variable float h
float t1 = dht1.readTemperature(); //Guarda la lectura de la temperatura en la variable float t
delay(2000);
float h2 = dht2.readHumidity(); //Guarda la lectura de la humedad en la variable float h
float t2 = dht2.readTemperature(); //Guarda la lectura de la temperatura en la variable float t
delay(2000);
float h3 = dht3.readHumidity(); //Guarda la lectura de la humedad en la variable float h
float t3 = dht3.readTemperature(); //Guarda la lectura de la temperatura en la variable float t
delay(2000);
float h4 = dht4.readHumidity(); //Guarda la lectura de la humedad en la variable float h
float t4 = dht4.readTemperature(); //Guarda la lectura de la temperatura en la variable float t
delay(2000);

client.add(ID1, t1); // 00 de shield y pin 11 arduino //"Sensor 1 Temperatura"
client.add(ID2, h1); // 00 de shield y pin 11 arduino //"Sensor 1 Humedad"
client.sendAll();

client.add(ID3, t2); // 01 de shield y pin 10 arduino //"Sensor 2 Temperatura"
client.add(ID4, h2); // 01 de shield y pin 10 arduino //"Sensor 2 Humedad"
client.sendAll();

client.add(ID5, t3); // 02 de shield y pin 9 arduino //"Sensor 3 Temperatura"
client.add(ID6, h3); // 02 de shield y pin 9 arduino //"Sensor 3 Humedad"
client.sendAll();

client.add(ID7, t4); // 03 de shield y pin 6 arduino //"Sensor 4 Temperatura"
client.add(ID8, h4); // 03 de shield y pin 6 arduino //"Sensor 4 Humedad"
client.sendAll();

////////////////////////////////////,

//////////////////////////////////// MANDA FUNCION SENO A UBIDOTS //////////////////////////////////////
hora = d.hour24h;
delay(2000);

client.add(ID10, funcion_seno(15.0, 1.0, 40.3, 20.5, hora)); // seno 1 15*SENO(X-40.3)+20.5
client.add(ID11, funcion_seno(17.5, 1.0, 40.3, 23.0, hora)); // seno 2 17.5*SENO(X-40.3)+23
client.sendAll();
client.add(ID12, funcion_seno(10.9, 1.0, 40.3, 16.4, hora)); // seno 3 10.9*SENO(X-40.3)+16.4
client.add(ID13, funcion_seno(13.0, 1.0, 40.3, 18.6, hora)); // seno 4 13*SENO(I4-40.3)+18.6
client.sendAll();

////////////////////////////////////,

//////////////////////////////////// MANDA RESULTADOS A MONITOR SERIE Y LLAMA A LA FUNCION DE CONTROL PARA CADA TUNEL

control(funcion_seno(15.0, 1.0, 40.3, 20.5, hora), t1, RELE1, RELES, ID14, ID18); // TUNEL 1 // seno 1 15*SENO(X-40.3)+20.5
control(funcion_seno(17.5, 1.0, 40.3, 23.0, hora), t2, RELE2, RELE6, ID15, ID19); // TUNEL 2 // seno 2 17.5*SENO(X-40.3)+23
control(funcion_seno(10.9, 1.0, 40.3, 16.4, hora), t3, RELE3, RELE7, ID16, ID20); // TUNEL 3 // seno 3 10.9*SENO(X-40.3)+16.4
control(funcion_seno(13.0, 1.0, 40.3, 18.6, hora), t4, RELE4, RELE8, ID17, ID21); // TUNEL 4 // seno 4 13*SENO(I4-40.3)+18.6

////////////////////////////////////,

/ FIN VOID LOOP

//////////////////////////////////// FUNCION PARA SENOS //////////////////////////////////////
float funcion_seno(float A, float B, float C, float D, float hora)
{
// no tendra correccion a minutos por que eso trava al programa solo seran horas
float resultado, minutos, correccion;

hora = hora * 0.273182174;

resultado = A*sin(B*hora-C)+D;

return resultado;
} /// FIN FUNCION SENO
////////////////////////////////////,

```

```

////////////////////////////////////// FUNCION PARA CONTROL ////////////////////////////////////////
void control(int tempseno, int tempsensor, int relehot, int relecold, char IDhot[], char IDcold[])
{
    float error, x;

    x = (tempseno - tempsensor) * 100;

    if ( x < 0 ) //caliente encender ventilacion
    {
        error = abs(tempseno - tempsensor);

        if ( error >= 0.5 )
        {
            digitalWrite(relehot, HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(relecold, LOW);
            delay(5000);

            client.add(IDcold, 1);
            client.add(IDhot, 0);
            client.sendAll();

        }

        else
        {
            digitalWrite(relecold, HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(relehot, HIGH);
            delay(5000);

            client.add(IDcold, 0);
            client.add(IDhot, 0);
            client.sendAll();

        }

    }

    else // ( x > 0 ) //caliente encender ventilacion //frio encender calefaccion /// POSIBLEMENTE TENGAMOS QUE HACER UN ELSE
    {
        error = abs(tempseno - tempsensor);

        if ( error >= 0.5 )
        {
            digitalWrite(relecold, HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(relehot, LOW);
            delay(5000);

            client.add(IDcold, 0);
            client.add(IDhot, 1);

            client.sendAll();

        }

        else
        {
            digitalWrite(relecold, HIGH);
            delay(5000);
            digitalWrite(relehot, HIGH);
            delay(5000);

            client.add(IDcold, 0);
            client.add(IDhot, 0);
            client.sendAll();

        }

    }

}

. ///// fin funcion control
//////////////////////////////////////

```