

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

## **EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE CHILE GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.)**

**YAMIR JIMÉNEZ VIVEROS**

**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 Yamir Jiménez Viveros, 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 Dr. José Alfredo Carrillo Salazar, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Efecto de la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo de chile guajillo (Capsicum annum L.)

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 16 de Noviembre de 2018.

  
Firma del  
Alumno (a)

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

La presente tesis titulada: Efecto de la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo de chile guajillo (*Capsicum annum* L.)  
realizada por el alumno: Yamir Jiménez Viveros

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  
FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ ALFREDO CARRILLO SALAZAR

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. ÓSCAR JAVIER AYALA GARAY

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. JUAN MANUEL GONZÁLEZ CAMACHO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2018.

# **EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE CHILE GUAJILLO (*Capsicum annuum* L.)**

Yamir Jiménez Viveros, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2018

## **RESUMEN**

En la producción de cultivos hortícolas en sistemas intensivos bajo cubierta plástica sin control de temperatura, es frecuente que la temperatura diurna sea mayor a la temperatura óptima de crecimiento, por lo que es relevante evaluar el impacto de la temperatura del aire máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) en el crecimiento y desarrollo del cultivo. En la primavera y verano de 2017 se establecieron tres experimentos independientes en diferentes fechas de siembra (f1: 03/04/2017, f2: 17/04/2017 y f3: 01/05/2017); en cada experimento se cultivaron plantas de chile guajillo (CP-1112) en tres tratamientos o ambientes cubiertos con plástico lechoso de 50 % de transmisión de la radiación en la banda fotosintética con  $T_{m\acute{a}x}$  promedio de: 33 °C (A33, testigo sin cubrimiento lateral), 40 °C (A40, en invernadero) y 42 °C (A42, en invernadero). Se determinó el número de días después del trasplante (ddt) y los grados día de desarrollo (gdd) cuando más de la mitad (50 % +1) de las plantas se encontraban en los siguientes eventos fenológicos: floración o aparición de la primera flor (DFL); fructificación o amarre del primer fruto (DFR) y madurez fisiológica del primer fruto (DM). Para esto se consideraron las temperaturas cardinales siguientes: Temperatura máxima de crecimiento ( $T_{mc}$ ) de 35 °C, temperatura óptima de crecimiento ( $T_{\acute{o}pt}$ ) de 24 °C y temperatura base ( $T_b$ ) de 10.8 °C. En cada experimento, se realizaron cinco muestreos destructivos en intervalos de 30 días para determinar la biomasa seca por planta (BSP, g) y de sus diferentes órganos vegetales: hoja (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y fruto (BSF). Se midió altura de planta (Alt, cm), altura de bifurcación del tallo (Altbif, cm), número de hojas por planta y área foliar por planta (AF,  $cm^2$ ). Con los datos de BSP y AF se calcularon los siguientes índices de eficiencia fisiológica: tasa de crecimiento relativo (TCR,  $g\ g^{-1}\ d^{-1}$ ), tasa absoluta de crecimiento (TAC,  $g\ d^{-1}$ ), la tasa de asimilación neta (TAN,  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) y el índice del área foliar (IAF,  $m^2\ hoja\ por\ m^2\ del\ suelo$ ). Los parámetros calculados fueron: la eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética (EUR,  $g\ MJ^{-1}$ ) y el área foliar específica (AFE,  $m^2\ g^{-1}$ ). Se hicieron correlaciones de Pearson entre las

variables y parámetros evaluados y las variables derivadas de  $T_a$  como son: temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ); temperatura mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ); Temperatura media ( $T_{med}$ ); oscilación térmica (OT), temperatura media diurna ( $T_{diurna}$ ); temperatura media nocturna ( $T_{nocturna}$ ), y la diferencia entre la  $T_{diurna}$  y la  $T_{nocturna}$  (DIF). Las plantas cultivadas en A42 fueron las primeras en alcanzar DFL ( $15 \pm 1$  ddt). La DFR en A40 se alcanzó 3 días en promedio antes que en A42 y que en A33. Conforme aumentó la  $T_{m\acute{a}x}$  disminuyeron los ddt a DM. En las plantas en A42 se observó DM 3 días antes que en A40 y hasta 13 días antes que en A33. La mayor acumulación de BSP se presentó consistentemente en A40 en los tres experimentos, de 11 a 29 % mayor que en las plantas cultivadas en A42, y de 27 a 48 % mayor que las plantas cultivadas en A33. La mayor altura en plantas fue de  $86.8 \pm 9.6$  cm y se observó en A40, la altura de bifurcación del tallo sólo presentó diferencias entre medias hasta los 136 ddt. Las plantas en A40 presentaron el mayor número de hojas y por lo tanto de AF. La cinética de acumulación de AF presentó curvas de tipo sigmoideal. Los índices de eficiencia fisiológica tuvieron un comportamiento similar entre ambientes la TRC inició con valores altos y disminuyó conforme avanzó el ciclo. El valor máximo de TAC y de TAN se presentó en el intervalo de los 46 a 76 ddt y posteriormente disminuyó hasta el final del experimento. Los valores más altos de IAF se observaron a los 136 ddt en plantas en A40 en los tres experimentos. El valor de EUR mayor fue de  $0.16 \pm 0.02$  en A40. El AFE fue alto al inicio del experimento y disminuyó progresivamente a lo largo del experimento.  $T_{med}$  se correlacionó ( $R > 0.80$ ) con Alt;  $T_{m\acute{i}n}$  y  $T_{nocturna}$  con BSH; y  $T_{med}$ ,  $T_{m\acute{a}x}$ , OT,  $T_{diurna}$  y DIF con BSR. Sin embargo, no se encontró correlación entre las variables derivadas de  $T_a$  y los parámetros EUR ni AFE. Con base en estos resultados, se observó efecto de la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo del cultivo de chile guajillo. Las plantas cultivadas a  $T_{m\acute{a}x}$  de  $40.5 \pm 0.55$  presentaron los valores mayores en las variables evaluadas, con un rendimiento en biomasa seca de fruto de 31.8 g/planta cuando el primer fruto alcanzó la madurez fisiológica.

**Palabras clave:** Análisis de crecimiento, temperatura de crecimiento, fenología, distribución de biomasa.

# **EFFECT OF THE AIR TEMPERATURE IN GROWTH AND DEVELOPMENT OF GUAJILLO CHILI (*Capsicum annuum* L.)**

Yamir Jiménez Viveros, M. Sc.  
Colegio de Postgraduados, 2018

## **ABSTRACT**

The production of horticultural crops in intensive systems under plastic cover without temperature control faces conditions where diurnal air temperature can be higher than the optimum growth temperature, so the impact of maximum air temperature ( $T_{\text{máx}}$ ) on growth and development of crops needs to be evaluated. In the spring and summer of 2017, three independent experiments were set up at different sowing dates (f1: 03/04/2017, f2: 17/04/2017 and f3: 01/05/2017). Plants of guajillo chili cv. CP-1112 were cultivated in each experiment in three treatments or environments covered with light diffuse plastic film with 50 % of PAR transmission with different  $T_{\text{max}}$  average: 33 °C (A33, control without lateral plastic film), 40 °C (A40, in greenhouse) and 42 °C (A42, in greenhouse). Degree days and number of days after transplant were calculated when plants reached 50 % of the following phenological events: flowering or first flower stage (DFL); fruiting or first fruit set (DFR) and first fruit physiological ripening (DM). Maximum growth temperature ( $T_{\text{mc}}$ ) of 35 °C, optimum growth temperature ( $T_{\text{opt}}$ ) of 24 °C and base temperature ( $T_{\text{b}}$ ) of 10.8 °C were used to calculate degree days. Five destructive samplings dates in each experiment were performed at intervals of 30 days to measure plant dry biomass (BSP, g), and dry biomass of each organ: leaves (BSH), stem (BST), root (BSR) and fruit (BSF). Plant height (Alt, cm), stem bifurcation height (Altbif, cm), number of leaves per plant and leaf area per plant (AF, cm<sup>2</sup>) were measured. Also, the relative growth rate (TCR, g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>), absolute growth rate (TAC, g d<sup>-1</sup>), the net assimilation rate (TAN, g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), the leaf area index (IAF, m<sup>2</sup> leave per m<sup>-2</sup> of the soil), the radiation use efficiency (EUR, g MJ<sup>-1</sup>) and the specific leaf area (AFE, m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) were calculated. Correlations between air temperature variables such as maximum temperature ( $T_{\text{max}}$ ); minimum temperature ( $T_{\text{min}}$ ); Average temperature ( $T_{\text{med}}$ ); thermal oscillation (OT), average daytime temperature ( $T_{\text{diurna}}$ ); average night temperature ( $T_{\text{nocturna}}$ ), difference between  $T_{\text{diurna}}$  and  $T_{\text{nocturna}}$  (DIF) and the response variables were calculated. Plants cultivated in A42

were the first to reach DFL ( $15 \pm 1$  ddt). DFR of plants in A40 were in average 3 days earlier than in A42, and in A33. As the  $T_{max}$  increased, the ddt to DM decreased. DM in plants grown in A42 occurred 3 days before than in A40, and 13 days before than in A33. The highest BSP was consistently obtained in A40 in the three experiments, which was 11 to 29 % higher than in plants grown in A42, and 27 to 48 % higher than in plants grown in A33. The highest height in plants was  $86.8 \pm 9.6$  cm and was observed in A40. The bifurcation height of the stem only shows differences between means up to 136 ddt. The largest number of leaves per plant and leaf area per plant were found in plants grown in A40. The kinetics of AF accumulation showed a sigmoidal type curve. There were not differences between treatments in the physiological efficiency indexes. TRC started with high values and decreased with time. The maximum values of TAC and TAN were observed from 46 to 76 ddt, and it decreased towards the end of the experiment. The highest values of IAF were consistently observed in the three experiments at 136 ddt in plants grown in A40. The highest value of EUR was  $0.16 \pm 0.02$  in A40. AFE had the highest value at the beginning of the experiment and decreased progressively with time.  $T_{med}$ , was correlated ( $R > 0.80$ ) with Alt;  $T_{mín}$  and  $T_{nocturna}$  with BSH; and  $T_{med}$ ,  $T_{máx}$ , OT,  $T_{diurna}$  and DIF with BSR. However, no correlation was found between the variables derived from  $T_a$  and EUR and AFE parameters. Results show that air temperature affected growth and development of guajillo chili crop. Plants grown at maximum temperature of  $40.5 \pm 0.55$  had the highest values in most of the variables evaluated, with a dry fruit biomass yield of 31.8 g/plant in the stage when the first fruit reached physiological maturity.

**Key words:** Growth analysis, growth temperature, phenology, biomass distribution.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Colegio de Postgraduados, Programa en Recursos Genéticos y Productividad - Fisiología Vegetal, por permitirme formarme como Maestro en Ciencias.

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

A mi consejero el Dr. José Alfredo Carrillo Salazar, por su amable atención desde el comienzo de mis estudios de posgrado, por su orientación y dedicación en esta investigación y por sus valiosos conocimientos compartidos.

A mis asesores, el Dr. Óscar Javier Ayala Garay y el Dr. Juan Manuel González Camacho, por las acertadas aportaciones y por estar al pendiente de la realización de esta investigación, gracias por sus enseñanzas. Al Dr. Manuel Livera Muñoz, quien fungió como sinodal para revisión de este escrito y por los conocimientos compartidos como profesor.

A la M. C. Diana Garfias Sánchez, gracias por todo el apoyo y amabilidad brindada a lo largo de mi estancia como estudiante.

A todo el equipo de trabajo del laboratorio de Fisiotecnia Vegetal y personal de campo.



## **DEDICATORIA**

Con profundo agradecimiento, amor y admiración a mis padres.

**Yamir Jiménez Viveros**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2. Hipótesis</b> .....	<b>3</b>
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. Importancia del cultivo</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Origen</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3. Taxonomía</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4. Descripción botánica de chile guajillo (<i>Capsicum annuum</i> L.)</b> .....	<b>7</b>
2.4.1. Semilla.....	7
2.4.2. Raíz.....	7
2.4.3. Tallo .....	8
2.4.4. Hoja .....	8
2.4.5. Flor .....	9
2.4.6. Fruto .....	9
<b>2.5. Crecimiento vegetal</b> .....	<b>10</b>
<b>2.6. Análisis de crecimiento vegetal</b> .....	<b>10</b>
<b>2.7. Influencia de la radiación solar y la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo de las plantas</b> .....	<b>12</b>
<b>2.8. Índices de eficiencia fisiológica</b> .....	<b>13</b>
2.8.1. Tasa de crecimiento relativo .....	13
2.8.2. Tasa absoluta de crecimiento .....	13

2.8.3. Tasa de asimilación neta .....	14
2.8.4. Índice de área foliar.....	14
<b>2.9. Parámetros fisiológicos .....</b>	<b>14</b>
2.9.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética.....	14
2.9.2. Área foliar específica .....	15
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Sitio experimental.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Datos meteorológicos.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3. Irradiancia solar diaria (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) .....</b>	<b>16</b>
<b>3.4. Material vegetal .....</b>	<b>17</b>
<b>3.5. Producción de plántula .....</b>	<b>17</b>
<b>3.6. Fase experimental.....</b>	<b>17</b>
3.6.1. Tratamientos .....	17
3.6.2. Condiciones de siembra y manejo del cultivo.....	18
<b>3.7. Variables respuesta .....</b>	<b>18</b>
3.7.1. Variables derivadas de la temperatura del aire.....	19
3.7.1.1. Temperatura base .....	19
3.7.2. Variables fenológicas .....	19
3.7.2.1. Grados día de desarrollo.....	20
3.7.3. Variables fisiológicas .....	20
3.7.3.1. Acumulación y distribución de biomasa .....	20
3.7.3.2. Fracción de fotoasimilados enviados a formación de órganos.....	21
3.7.4. Variables Morfológicas .....	21
3.7.4.1. Altura de la planta y altura de bifurcación del tallo .....	21
3.7.4.2. Número de hojas y área foliar .....	21
3.7.5. Índices de eficiencia fisiológica .....	21
3.7.5.1. Tasa de crecimiento relativo .....	21
3.7.5.2. Tasa absoluta de crecimiento .....	22

3.7.5.3. Tasa de asimilación neta .....	22
3.7.5.4. Índice de área foliar .....	22
<b>3.8. Parámetros fisiológicos .....</b>	<b>23</b>
3.8.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética .....	23
3.8.2. Área foliar específica .....	23
<b>3.9. Análisis estadístico de datos .....</b>	<b>23</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1. Irradiancia solar .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2. Temperatura del aire (Ta).....</b>	<b>26</b>
4.2.1. Temperatura base de crecimiento.....	32
<b>4.3. Etapas fenológicas .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4. Componentes del rendimiento.....</b>	<b>34</b>
<b>4.5. Variables fisiológicas.....</b>	<b>36</b>
4.5.1. Acumulación y distribución de biomasa .....	36
<b>4.6. Variables morfológicas .....</b>	<b>46</b>
4.6.1. Altura de la planta .....	46
4.6.2. Altura de bifurcación del tallo.....	47
4.6.3. Número de hojas y Área foliar .....	49
<b>4.7. Índices de eficiencia fisiológica.....</b>	<b>53</b>
4.7.1. Tasa de crecimiento relativo .....	53
4.7.2. Tasa absoluta de crecimiento .....	54
4.7.3. Tasa de asimilación neta .....	54
4.7.4. Índice de área foliar.....	58
<b>4.8. Parámetros fisiológicos .....</b>	<b>59</b>
4.8.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética.....	59
4.8.2. Área foliar específica .....	61
<b>4.9. Correlación de variables.....</b>	<b>63</b>

**5. CONCLUSIONES.....67**  
**6. BIBLIOGRAFÍA.....68**

## LISTA DE CUADROS

- Cuadro 1. Estadísticos descriptivos y prueba de medias de la irradiancia solar diaria transmitida por el plástico ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) e incidente sobre las plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México durante el año 2017. ....25
- Cuadro 2. Medias de temperatura mínima ( $T_{\text{mín}}$ , °C), media ( $T_{\text{med}}$ , °C) y máxima ( $T_{\text{máx}}$ , °C) del aire registrada en la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (EM), y con un HOBO en los ambientes evaluados (A33, A40, A42) en un experimento de análisis de crecimiento de chile guajillo cultivado en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Estado de México. ....29
- Cuadro 3. Temperatura media diurna y nocturna (°C) y DIF (°C) registrada por un HOBO en los ambientes evaluados (A33, A40, A42) en un experimento de análisis de crecimiento de chile guajillo cultivado en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Estado de México. ....29
- Cuadro 4. Fenología del cultivo de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en función de días después del trasplante (ddt) y grados día de desarrollo (gdd) en un experimento establecido tres fechas de cultivo (f1 del 26/05/2017 al 09/10/2017, f2 del 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3 del 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....34
- Cuadro 5. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.....35
- Cuadro 6. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.....35
- Cuadro 7. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.....36
- Cuadro 8. Medias de la biomasa seca (g/planta) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1,

26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	40
Cuadro 9. Medias de la biomasa seca (g) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	40
Cuadro 10. Medias de la biomasa seca (g) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	41
Cuadro 11. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	50
Cuadro 12. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	50
Cuadro 13. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	51
Cuadro 14. Media del índice de área foliar (IAF, m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> ) por ambiente de plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	59
Cuadro 15. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) de plantas de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	60

Cuadro 16. Correlaciones de Pearson entre variables derivadas de la temperatura del aire, parámetros y variables medidas en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.  
.....64



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Promedio de temperatura máxima (T<sub>máx</sub>, °C) en los ambientes A33 (□), A40 (■) y A42 (■) en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....27
- Figura 2. Temperatura promedio horaria en los ambientes A33 (-○-), A40 (-□-) y A42 (-△-) de un experimento en plantas de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo del (26/05/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....31
- Figura 3. Medias de Biomasa Seca Total (BST, g.m<sup>-2</sup>) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●-), A40 (-▲-) y A42 (-■-), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. Medias con letras iguales son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha = 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. ....38
- Figura 4. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz ■ y frutos ■ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....43
- Figura 5. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz ■ y frutos ■ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....44
- Figura 6. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz ■ y frutos ■ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....45
- Figura 7. Medias de altura de planta (cm) a los 136 ddt en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●), A40 (▲) y A42 (■), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017

al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	48
Figura 8. Medias de Área Foliar (AF, cm <sup>2</sup> ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●-), A40 (-▲-) y A42 (-■-), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. Medias con letras iguales son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha = 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. ....	52
Figura 9. Tasa Relativa de Crecimiento (TRC, g g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--), A42 (--■--) y A44 (--×--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	55
Figura 10. Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC, g d <sup>-1</sup> ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--), A42 (--■--) y A44 (--×--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	56
Figura 11. Tasa de Asimilación Neta (TAN, g m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--), A42 (--■--) y A44 (--×--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	57
Figura 12. Área Foliar Específica (AFE) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--), y A42 (--■--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo ( <i>Capsicum annuum</i> L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....	62
Figura 13. Medias de Biomasa Seca de Hojas (BSH, g <sup>-1</sup> ) a los 136 ddt en correlación (R = 0.84) con la Temperatura mínima (Tmín, °C) ajustado a un modelo exponencial ( $y = 3E - 05e^{1.11x}$ , R <sup>2</sup> = 0.76) en las tres fechas de cultivo establecidas (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017,	

f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....65

Figura 14. Medias de Biomasa Seca de Hojas (BSH, g<sup>-1</sup>) a los 136 ddt en correlación (R = 0.85) con la Temperatura media nocturna (Tmedia nocturna, °C) ajustado a un modelo exponencial ( $y = 7E - 06e^{0.98x}$ , R<sup>2</sup> = 0.76) en las tres fechas de cultivo establecidas (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. ....66

## 1. INTRODUCCIÓN

México es considerado uno de los países con mayor diversidad vegetal en el mundo y uno de los principales centros de domesticación de especies vegetales que forman parte importante de la alimentación mundial (Hernández, 2011). Dentro de las primeras plantas domesticadas en el continente americano está el chile (*Capsicum*); cultivo que ha jugado un papel relevante en la cultura y la alimentación de la población mexicana desde épocas prehispánicas (Long-Solís, 1986).

El chile es una especie que pertenece a la familia Solanaceae; la gran diversidad en los cultivares difieren en los rasgos hortícolas, incluidos el tamaño, forma y color del fruto, sabor y pungencia (Sugiyanta y Kartika, 2018). De las especies nativas de chile, los primeros pobladores en México, América Central y América del Sur, domesticaron al menos cinco especies de forma independiente en diferentes regiones, y algunas otras aún se recolectan en su hábitat natural (Bosland *et al.*, 2012). Las cinco especies domesticadas son *C. annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens* (IPGRI, 1995).

La riqueza constituida por la diversidad genética del chile se encuentra distribuida a lo largo y ancho de México, tanto en formas cultivadas como silvestres; *Capsicum annum* L., es la especie de chile con mayor importancia, por la extensión de su cultivo y el valor económico de su producción (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010); además, desempeña un papel muy importante en la alimentación humana al poseer varias propiedades nutricionales que son favorables para la salud (Howard *et al.*, 2000); su pungencia típica contribuye a su amplia utilización en la industria alimentaria (Takahashi *et al.*, 2018).

En la actualidad, el cultivo de chile se encuentra entre las especies hortofrutícolas más cultivadas en el mundo, después del tomate (FAOSTAT, 2016). Su producción se divide en dos vertientes: producción de chiles en fresco o verdes y de chiles secos; la producción de chiles secos tiene gran importancia en México, el chile guajillo es uno de ellos, y se usa ampliamente en la gastronomía mexicana, los estados donde más se cultiva este tipo de chile son Zacatecas y Durango y, en menor escala, San Luis Potosí, Chihuahua, Aguascalientes y

Jalisco (Bravo *et al.*, 2006) con un volumen de producción de 46,530 t y un valor de la producción de más de 2 mil millones de pesos en el año 2016 (SIACON, 2016).

Diversos factores ambientales afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas, como la luz, el agua y la temperatura del aire, las variaciones significativas de la temperatura del aire pueden limitar el crecimiento de las plantas tanto en temperaturas bajas como altas (Lefsrud *et al.*, 2005).

La temperatura global ha tenido un incremento significativo en los últimos años y se espera que aumente más durante el próximo siglo, se prevé que las temperaturas máximas diarias anuales aumenten a una tasa de 1 a 3.7 °C a mediados del siglo XXI y de aproximadamente 5 °C a fines del siglo XXI. Esto daría lugar a eventos de sequía más recurrentes y extremos en muchas partes del mundo (IPCC, 2014; Okunlola *et al.*, 2017).

La temperatura es uno de los principales factores ambientales que influye en el crecimiento y por supuesto en el desarrollo de los cultivos, la velocidad de muchos procesos de crecimiento de las plantas están controlados por la temperatura del aire, lo cual resulta en una reducción significativa en el rendimiento (Wheeler *et al.*, 2000).

Diversos estudios se han enfocado en investigar cómo la temperatura del aire, incluso la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico, esperados en los escenarios del cambio climático afectan en el crecimiento de las plantas; el cultivo de chile es sensible a los cambios de temperatura fuera de su rango óptimo de crecimiento, afectando a las variables fenológicas (Erickson y Markhart, 2002; Garruña-Hernández *et al.*, 2012), fisiológicas (Kim *et al.*, 2013), morfológicas (De Swart *et al.*, 2010), y en los parámetros e índices fisiológicos de crecimiento (De Swart *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2015).

En la presente investigación se evaluó el efecto de la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo de una colecta de chile guajillo. La información sistematizada sobre el crecimiento y desarrollo de este material vegetal, que es un recurso fitogenético importante, es escasa. Por lo anterior se plantean los siguientes objetivos.

## **1.1. Objetivo**

Determinar el efecto de la temperatura del aire en las variables y parámetros de crecimiento y desarrollo del cultivo de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en 3 ambientes contrastantes de temperatura

## **1.2. Hipótesis**

Las fluctuaciones en la temperatura del aire fuera del rango óptimo de crecimiento del cultivo de chile guajillo puede provocar cambios en el crecimiento y desarrollo.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Importancia del cultivo

El género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae* (Prohens y Rodríguez-Burruezo, 2010) y cuenta con 32 especies reconocidas, entre las que se encuentran especies silvestres, semicultivadas y cinco domesticadas: *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. annuum* (Bosland, 1994). *Capsicum annuum* L. es la especie cultivada más conocida y la de mayor importancia económica (Pickersgill, 1997).

Cerca de 89 % del área cultivada con chile en el mundo se encuentran en el continente asiático, en países como India, China, Corea, Tailandia, Vietnam, Sri Lanka e Indonesia. La segunda región productora más importante incluye a México y Estados Unidos con 7 % del área cultivada, mientras que 4 % restante se encuentra en países de Europa, África y Medio Oriente (Rufino y Penteadó, 2006).

El cultivo de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) también conocido con el nombre de Mirasol y Guajón, es uno de los cuatro tipos de chile más importantes en el país por su volumen de producción, en nuestro país se siembran cada año más de 40 mil hectáreas, siendo el más importante en superficie después del tipo jalapeño; 90 % de la superficie sembrada se ubica en el Altiplano norte centro de México que comprende los estados de San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Aguascalientes y Guanajuato (Ramiro, 2001), con rendimientos medios en el año 2016 de 1.5 a 2 t de chile seco por ha (SIACON, 2016).

El cultivo de chile se realiza bajo condiciones de riego y generalmente los frutos se cosechan cuando están completamente secos. Sin embargo, cuando existe un buen precio en el mercado, la cosecha de chile maduro se realiza en fresco para ser secado artificialmente en deshidratadoras (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

## 2.2. Origen

Todas las especies del género *Capsicum* son originarias de América, la distribución precolombina de este género se extendió probablemente desde el borde más meridional de los Estados Unidos a la zona templada del sur de Sudamérica (Heiser, 1964) y después de los viajes de Cristóbal Colón, alrededor del mundo (Perry *et al.*, 2007).

Eshbaugh (1977) especula que Bolivia es el centro nuclear de *Capsicum* y que el origen de los taxones domesticados se remonta a esta área. Sin embargo, esto no implica que cada una de las especies surgió en Bolivia; la evidencia respalda el origen mexicano-centroamericano del *C. annuum* domesticado, mientras que las otras especies domesticadas pudieron haber surgido en América del sur (Prohens y Rodríguez-Burruezo, 2010).

La evidencia arqueológica de México indica que los humanos han estado utilizando chiles silvestres como fuente de alimento posiblemente desde 8000 A. C., no solo como condimentos ocasionales, sino también como componentes de una dieta compleja y sofisticada (Byers, 1967). Una combinación de evidencias arqueológicas, análisis genéticos y distribuciones modernas de plantas ha llevado a los investigadores a sugerir que *C. annuum* fue inicialmente domesticado en México (Perry *et al.*, 2007).

La evidencia más antigua de chiles domesticados se encontró en una cueva en el valle de Tehuacán (sur-centro de México), aproximadamente en el año 5000 a 6000 A. C. (Pickersgill, 1969).

Por lo tanto, al ser considerado como uno de los principales centros de domesticación de la especie *annuum*, en México se encuentra una amplia diversidad de tipos de chile, destacando el chile guajillo (Ramiro, 1992).



### 2.3. Taxonomía

La taxonomía del género *Capsicum* es compleja, debido a la gran variabilidad de tipos existentes en las formas cultivadas y a la diversidad de criterios utilizados en su clasificación, además de que a lo largo de los años ha sufrido muchas modificaciones (Nuez *et al.*, 2003).

Debido a esta situación de confusión, y a una falta de acuerdo a nivel general sobre la nomenclatura de las especies domesticadas, se provocó que a menudo se usara el mismo nombre científico para referirse a distintos taxones por lo que la Comisión Internacional de Recursos Fitogenéticos, IBPGR por sus siglas en inglés (*International Board for Plant Genetic Resources*), convocó en 1980 una reunión de expertos sobre recursos genéticos de *Capsicum*, que necesariamente abordó la problemática taxonómica.

Sin embargo, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA (por sus siglas en inglés de *United States Department of Agriculture*), contempla la clasificación descrita por Lineo y que es aceptada internacionalmente.

Reino:	<i>Plantae</i>
Subreino:	Tracheobionta
Superdivisión:	<i>Spermatophyta</i>
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	<i>Asteridae</i>
Orden:	<i>Solanales</i>
Familia:	<i>Solanaceae</i>
Género:	<i>Capsicum</i> L.
Especie:	<i>Capsicum annuum</i> L.

Fuente: USDA

## **2.4. Descripción botánica de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.)**

La descripción de los chiles se ha realizado mediante la aplicación de los descriptores para *Capsicum* propuestos por el Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI, 1995). A continuación, se presenta la descripción botánica realizada por Nuez *et al.* (2003) en su libro: El cultivo de pimientos, chiles y ajíes.

### **2.4.1. Semilla**

La semilla se desarrolla a partir del primordio seminal, tiene una forma aplanada hemidiscoidal, el lado más recto presenta el hilo, cicatriz que queda en la zona del funículo al madurar y separarse la semilla de la placenta. La superficie es relativamente lisa, sin aspecto pubescente, la mayoría de las semillas se sitúan en la región de la placenta central del fruto. Las semillas presentan color amarillento y está formada por la testa, el endospermo y el embrión

### **2.4.2. Raíz**

Consta de una raíz axonomorfa de la que se ramifica un conjunto de raíces laterales. La ramificación adopta al principio una forma de punta de flecha triangular, con el ápice en el extremo del eje de crecimiento, posteriormente se forma una densa borla de raíces la cual profundiza en el suelo hasta unos 30-60 cm, aunque la distribución no es uniforme, con mayor densidad en la parte superficial. Horizontalmente el crecimiento se extiende hasta unos 30-50 cm del eje.

El peso del sistema radical es solo de 7 a 17 % del peso total de la planta, en función del tipo varietal y de las condiciones del cultivo. En las plantas jóvenes la proporción relativa del sistema radical respecto a la biomasa total es mayor que en las adultas (Somos, 1984).

### **2.4.3. Tallo**

El tallo principal se desarrolla a partir de la plántula del embrión y consta de un eje, el epicótilo, y presenta en el extremo superior una región de intensa división celular, el meristemo apical. En esta región empiezan a desarrollarse los primordios foliares. Por debajo del meristemo apical, desde el exterior hacia el interior se encuentran, como en otras dicotiledóneas, la epidermis, el cortex caulinar y el cilindro vascular.

La epidermis envuelve externamente al tallo. Está formada por células epidérmicas típicas recubiertas de cutina, sustancia lipídica muy resistente. Hacia el exterior se forman tricomas glandulares, también existen estomas que permiten el intercambio gaseoso.

El cortex caulinar es una corona cilíndrica formada principalmente por células parenquimáticas de paredes finas. Presenta abundantes cloroplastos (clorénquima). En el límite del cortex y el cilindro vascular no hay endodermis bien diferenciada.

El cilindro vascular está formado por un sistema vascular envolviendo a la médula o porción central del tallo. Análogamente como ocurre en la raíz, existe también un periciclo entre el cortex y el cilindro vascular. A partir de sus células pueden originarse raíces adventicias, de modo idéntico a la formación de raíces laterales a partir de la raíz principal.

### **2.4.4. Hoja**

Las constituyen apéndices u órganos laterales del tallo. La mayoría de los autores enfatiza la profunda relación fitogenética y estructural entre el tallo y las hojas, considerando a ambos como parte de una unidad, el brote. No obstante, la hoja presenta especializaciones morfológicas y estructurales relacionadas con su función más importante, la fotosíntesis. Entre estas cabe destacar la gran superficie externa, la abundancia de cloroplastos en el tejido fundamental (mesófilo), la estrecha relación entre los tejidos vascular y fundamental y la amplia red de espacios intracelulares.

El chile tiene hojas simples, de forma lanceolada o obovada, formadas por el peciolo largo, que une la hoja con el tallo, y la parte extendida, la lámina foliar o limbo. Esta es de borde entero o apenas sinuado en la base. Los tejidos del peciolo son similares a los del tallo.

#### **2.4.5. Flor**

Las flores son los órganos reproductores de la planta, siendo en el chile hermafroditas, esto es, la flor produce gametos masculinos y femeninos. En *C. annuum* las flores aparecen solitarias en cada nudo. El crecimiento longitudinal de las ramas termina con una flor, normalmente una planta puede producir cientos de flores.

Las flores están unidas al tallo por un pedúnculo o pedicelo de 10 a 20 mm de longitud. La estructura de este es semejante a la de un tallo vegetativo. Cada flor está constituida por un eje o receptáculo y apéndices foliares que constituyen las partes florales.

#### **2.4.6. Fruto**

El fruto de *Capsicum annuum* L., es el único órgano de la planta que tiene importancia económica. El fruto se desarrolla a partir del gineceo de la flor y más concretamente a partir del ovario fecundado. No obstante, otras estructuras florales como el pedúnculo, receptáculo y cáliz están también presentes en el fruto maduro.

El fruto se define botánicamente como una baya, se trata de una estructura en forma de cápsula, verosímelmente a esta peculiaridad se debe el nombre científico del género, *Capsicum* (del griego kapsakes, cápsula). La baya está constituida por un pericarpio grueso y jugoso y un tejido placentario al que se unen las semillas.

El pericarpio está formado por tres capas: el epicarpio o capa externa, el mesocarpio o zona carnosa intermedia y el endocarpio o capa membranosa interna. Esta estructura se reconoce ya en la pared del ovario antes de la antesis, formada por un conjunto de 8-10 capas de células poco diferenciadas.

## **2.5. Crecimiento vegetal**

Todos los organismos vivos son, en varias etapas de su ciclo de vida, capaces de crecer, dadas las condiciones adecuadas, esto puede significar un cambio en el tamaño, cambio en la forma y/o cambio en número. Estos tres procesos juntos forman una parte importante del fenómeno de la vida, el crecimiento (Hunt, 1990).

El crecimiento se define como un incremento constante en el tamaño de un organismo, que está acompañado de 2 procesos: morfogénesis y diferenciación (Taiz y Zeiger, 2006); los cambios cuantitativos tienen lugar durante el desarrollo o morfogénesis y puede definirse, por tanto, como el conjunto de cambios graduales y progresivos en tamaño (crecimiento), estructura y función mientras que diferenciación se refiere a los cambios cualitativos (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

Aunque la terminología que se ha adoptado para definir crecimiento, tiene la virtud de unificar conceptos (desarrollo y morfogénesis), otros investigadores consideran que el desarrollo comprende tres procesos interrelacionados: crecimiento, diferenciación y morfogénesis. Según este punto de vista, la morfogénesis es el proceso que integra y coordina crecimiento y diferenciación, y que explica el origen de los caracteres morfológicos y la forma global del organismo (Azcón-Bieto y Talón, 2008).

## **2.6. Análisis de crecimiento vegetal**

El proceso de crecimiento de la planta se puede estudiar en varios niveles de detalle, por ejemplo, en el nivel fisiológico en el que se analiza la formación de tejido vegetal nuevo en términos de los efectos de las hormonas vegetales, de las vías bioquímicas y de la forma en que las sustancias son transportadas de un órgano de planta a otro. En el nivel de estudio agronómico, estos procesos fisiológicos se dan por sentados y la formación del rendimiento se relaciona inmediatamente con factores de manejo como la nutrición, el riego, la rotación de cultivos y el laboreo del suelo (Goudriaan y Van Laar, 2012).

El análisis de crecimiento vegetal es una aproximación con un enfoque explicativo, holístico e integral para interpretar la forma y función de la planta (Evans, 1972). Utiliza datos primarios simples en forma de pesos, áreas, volúmenes y contenido de los componentes de la planta para investigar procesos que involucran el comportamiento del crecimiento (Hunt, 1990).

Las técnicas de análisis de crecimiento de plantas son, potentes herramientas comparativas (Hunt, 1990), pueden basarse directamente en la evolución cronológica de medidas, como biomasa seca, longitud de tallos, número de hojas y de ramas, etc. (Manrique, 1990).

En el análisis de crecimiento se utilizan curvas las cuales reflejan el comportamiento de una planta en un ecosistema particular con respecto al tiempo, su elaboración es indispensable para la aplicación racional de las labores culturales en el momento adecuado, para garantizar una respuesta óptima de la planta, etc. (Casierra-Posada *et al.*, 2003).

El análisis de crecimiento de la planta es requerido para explicar las diferencias en el crecimiento, por ejemplo, para evaluar diferencias entre especies que crecen bajo el mismo ambiente o de una especie que crece en diferentes ambientes (Vijay *et al.*, 2017).

El patrón de crecimiento de un organismo usualmente se describe por medio de la curva sigmoidea. De acuerdo a Steward (1969) se observan tres fases en la curva sigmoidal: i) Fase de retardación: ocurre cuando las plantas comienzan a perder masa seca durante el proceso de germinación. A medida que se desarrolla el embrión se van agotando las reservas de la semilla. ii) Fase logarítmica: en ella el crecimiento se da rápidamente y de forma lineal. iii) Fase de envejecimiento: el crecimiento comienza a decrecer disminuyendo por ende la masa seca.

Hay dos metodologías para efectuar el análisis de crecimiento, i) Análisis tradicional o clásico que involucra la toma de datos en función del tiempo (cada 1-2 semanas) en un gran número de muestras (Gardner *et al.*, 2003), con los cuales se generan funciones paramétricas flexibles que describen y explican el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como la

elaboración de curvas de crecimiento. ii) Análisis funcional o dinámico el cual comprende medidas a intervalos de tiempos más frecuentes y en un pequeño número de plantas (Flórez *et al.*, 2006).

El análisis funcional presenta algunas ventajas sobre el método clásico, entre ellas que efectúa el análisis con base en la masa seca y área foliar en función del tiempo, utiliza el método de regresión para el análisis, empleando datos disponibles en un tiempo, mientras que el método clásico requiere de datos de varias cosechas, requiere tomar datos a intervalos de tiempo frecuentes y en un pequeño número de plantas (Radford, 1967).

## **2.7. Influencia de la radiación solar y la temperatura del aire en el crecimiento y desarrollo de las plantas**

El sector agrícola se ve directamente afectado por cambios en la temperatura, precipitación y concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, pero también, la cantidad de radiación solar recibida en una superficie es importante en la actividad agrícola, debido a que los procesos fisiológicos y el crecimiento de los cultivos dependen en gran medida de la cantidad de energía disponible (Kjaersgaard *et al.*, 2007; Yadav *et al.*, 2011) La mayor parte de la radiación solar absorbida por el dosel de un cultivo es interceptada por las hojas, aunque también las otras partes de la planta pueden contribuir al proceso de absorción de la radiación (Márquez *et al.*, 2017).

Una de las principales funciones de las plantas es la transformación natural de la radiación solar en fibra, aceites, proteínas e hidratos de carbono; el manejo del arreglo de la planta, la distribución del órgano espacial y la densidad de la planta deben ser apropiados para la máxima interceptación de la radiación fotosintéticamente activa en el dosel de la planta para maximizar la acumulación de biomasa seca durante el crecimiento vegetativo y las etapas reproductivas (Chavarria *et al.*, 2017).

Además de la radiación, la temperatura del aire puede provocar estrés térmico en las plantas, afectando directamente en el crecimiento y desarrollo, esto depende de la intensidad y la

duración del estrés, las especies de plantas y la etapa de crecimiento de la planta. La reducción de la fotosíntesis y el aumento de hidratos de carbono en sustancias inhibitoras del crecimiento y la reducción de hormonas; el metabolismo reducido y la reducción de la superficie foliar probablemente son los principales factores que reducen las características de crecimiento (Wahid *et al.*, 2007; Haroun *et al.*, 2011)

## **2.8. Índices de eficiencia fisiológica**

Hunt (1978) explica que el análisis de crecimiento es una aproximación cuantitativa, que usa datos simples y básicos, para la descripción e interpretación de las plantas que crecen bajo ambiente natural o controlado.

El análisis matemático de crecimiento usa medidas directas tales como masa seca total de la planta, área foliar total y tiempo; y medidas derivadas como son la tasa de crecimiento relativo (TCR), la tasa absoluta de crecimiento (TAC), la tasa de asimilación neta (TAN) y el índice del área foliar (IAF) que pueden ser obtenidas a partir de las medidas directas (Melgarejo, 2010).

### **2.8.1. Tasa de crecimiento relativo**

La TRC explica cómo el crecimiento ya efectuado contribuye al nuevo que se está formando, de tal modo que representa el incremento en biomasa seca por unidad de biomasa seca presente, por unidad de tiempo. Proporciona una integración conveniente del funcionamiento de varias partes de la planta pues puede ser calculada para cada órgano vegetal siendo útil para comparar diferencias entre especies y tratamientos en condiciones uniformes (Hunt, 1978).

### **2.8.2. Tasa absoluta de crecimiento**

Representa la ganancia en peso por unidad de tiempo (Hunt, 1978) y está en función de la cantidad de material en crecimiento presente y la tasa de funcionamiento del mismo con



relación a la influencia del ambiente. Durante la ontogenia de la planta, hay un periodo en que la tasa del crecimiento es cada vez mayor, seguido por una etapa en que se mantiene más o menos constante, para luego comenzar a disminuir, de tal forma que se vuelve negativa porque la muerte de las hojas es superior al crecimiento nuevo (Milthorpe y Moorby, 1982)

### **2.8.3. Tasa de asimilación neta**

Esta tasa corresponde a la ganancia en peso por unidad de área por unidad de tiempo (Hunt, 1978) y es una medida indirecta de la fotosíntesis. La TAN disminuye al avanzar la ontogenia del cultivo y esto se debe al sombreado de las hojas superiores sobre las inferiores, a la disminución de la capacidad fotosintética de las últimas hojas formadas y a los efectos de los lugares de demanda sobre la fotosíntesis (Milthorpe y Moorby, 1982).

### **2.8.4. Índice de área foliar**

Dado que la tasa de asimilación neta proporciona una adecuada estimación de la eficiencia de las hojas de un cultivo como productoras de biomasa seca, entonces el conocer la cantidad de hojas del cultivo es necesario para evaluar su rendimiento. El área foliar por planta no toma en cuenta el espaciamiento entre plantas, un factor que debe estar involucrado en la estimación de la cantidad de hojas de todo un cultivo. Por lo tanto, el índice de área foliar se define como la cantidad de hojas con relación al área de cultivo (Hunt, 1978).

## **2.9. Parámetros fisiológicos**

### **2.9.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética**

Existe una estrecha relación entre la cantidad de radiación recibida por un cultivo y su crecimiento. Monteith (1972) fue el primero en distinguir la función de cultivo en la absorción de energía solar de su función en la transformación de la energía interceptada en biomasa (Bonhomme, 2000).

La eficiencia con la que los cultivos o las comunidades naturales producen biomasa seca se define como la cantidad neta de energía solar almacenada por la fotosíntesis en cualquier período, dividida por la constante solar integrada durante el mismo período (Monteith, 1972).

El coeficiente de conversión, definido como la cantidad de biomasa producida por unidad de radiación interceptada ( $\text{g MJ}^{-1}$ ), proporciona una medida de la eficiencia con la que se utiliza la radiación capturada para producir nuevo material vegetal; el término alternativo, eficiencia de uso de radiación (EUR), también se usa comúnmente (Black y Ong, 2000).

### **2.9.2. Área foliar específica**

El desarrollo de la hoja comprende una gran cantidad de procesos genéticos, bioquímicos y fisiológicos, desde el inicio de la hoja hasta la construcción de un órgano fotosintético complejo y eficiente (Giannopoulos *et al.*, 2018)

El área de la hoja (AF) y la biomasa seca de hojas difieren en sus distribuciones dentro del dosel; sus distribuciones relativas pueden relacionarse entre sí a través de la variación espacial en el área foliar específica (SLA), describe la relación entre el área proyectada y la biomasa seca, es un importante indicador de la respuesta biológica a los cambios en condiciones de crecimiento (Ellsworth y Reich, 1993; Reich *et al.*, 1997; Williams y Nelson, 2018)

El área foliar específica (AFE) ha sido descrita por (Hunt, 1978) como un indicador del grosor de la hoja, es decir, la relación entre el área foliar y la biomasa seca.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Sitio experimental

La investigación se realizó en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, ubicado en Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, a  $19^{\circ} 27' 36.47''$  de latitud norte y  $98^{\circ} 54' 12.73''$  longitud oeste y una altitud de 2250 msnm, durante el ciclo de primavera-verano de 2017.

#### 3.2. Datos meteorológicos

Se emplearon sensores de tipo Data Loggers (Hobo<sup>®</sup>, Onset Computer Corporation, USA) en cada ambiente, programados para registrar datos cada 15 min de temperatura del aire ( $T_a$ , °C) y humedad relativa (%), estos fueron colocados a 50 cm sobre el suelo y cubiertos en la cara superior con material aislante para evitar la absorción de radiación solar incidente.

También, se obtuvieron registros diarios de la temperatura máxima y mínima del aire (°C) y la irradiancia solar instantánea diaria ( $J m^{-2} s^{-1}$ ) de la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo situada a 100 m de distancia del sitio experimental.

#### 3.3. Irradiancia solar diaria ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ )

La irradiancia solar instantánea ( $J m^{-2} s^{-1}$ ) obtenida cada 5 min de la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, se usó para integrar el área bajo la curva de la radiación global con el programa Curve Expert<sup>®</sup> y se calculó la irradiancia solar diaria ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) en el periodo experimental.

### **3.4. Material vegetal**

Se utilizaron semillas de una colecta de chile guajillo (CP-1112) originarias de Ojo Caliente, Zacatecas (2009). El material vegetal fue proporcionado por el banco de germoplasma del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

### **3.5. Producción de plántula**

La siembra se realizó en charolas de poliestireno previamente esterilizadas de 66.6 cm de largo, 34.2 cm de ancho y 7 cm de altura con 200 cavidades de 2.5 cm de largo, 2.5 cm de ancho y 6.8 cm de altura. El sustrato usado fue turba comercial de la marca SUNSHINE®, diseñada para la producción de plántulas en invernadero. Cada semilla se colocó a 0.5 cm de profundidad en cada cavidad. Las charolas se regaron con agua y se cubrieron con plástico negro con el fin de almacenar calor y promover la germinación, posteriormente, se descubrieron y colocaron individualmente en condiciones de invernadero a los 8 días cuando inició la emergencia de las plántulas.

Las plántulas se regaron diariamente con agua simple durante la emergencia hasta que los cotiledones estaban completamente extendidos, después se usó 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<sup>-1</sup>.

### **3.6. Fase experimental**

#### **3.6.1. Tratamientos**

Se evaluaron tres tratamientos o ambientes de cultivo en ambientes contrastantes en temperatura bajo cubierta plástica blanca con 50 % de transmisión de la radiación solar, ambiente sin cubrimiento lateral (A33) con temperatura promedio máxima (T<sub>máx</sub>) de 32.9 ± 0.3 °C, ambiente en un invernadero con T<sub>máx</sub> de 42.0 ± 0.05 °C (A42), y ambiente en un invernadero con 40.5 ± 0.55 °C (A40).

### **3.6.2. Condiciones de siembra y manejo del cultivo**

Se realizaron tres experimentos independientes en diferentes fechas de siembra (f1: 03/04/2017, f2: 17/04/2017 y f3: 01/05/2017), cuando las plántulas alcanzaron aproximadamente los 15 cm de altura, se trasplantaron en bolsas negras de polietileno para trasplante de 35 x 35 cm, usando tierra negra como sustrato, previamente esterilizada, el trasplante se realizó a los 53 días después de la siembra (dds) (f1: 26/05/2017, f2: 02/06/2017 y f3: 10/06/2017).

Se aplicaron riegos al menos tres veces por semana para mantener el sustrato a capacidad de campo y la fertilización se hizo una vez por semana con Triple-18 ULTRASOL<sup>®</sup> marca SQM<sup>®</sup> aplicado en el riego a la dosis de 2 g L<sup>-1</sup>. El control de malezas se realizó de manera manual y para el control de plagas se aplicó Flonicamid marca Beleaf<sup>®</sup> de manera foliar a la dosis de 1 g L<sup>-1</sup> cada 15 d.

Las plantas se ubicaron aleatoriamente en hileras con una distancia entre plantas y entre hileras de 30 cm, a una densidad de 5 plantas/m<sup>2</sup> y 25 repeticiones por ambiente. Al establecer el experimento en estructuras diferentes no se usó un diseño experimental definido. El estudio terminó en cada experimento a los 136 días después del trasplante (ddt) (f1: 09/10/2017, f2: 16/10/2017 y f3: 24/10/2017) cuando al menos un fruto presentó madurez fisiológica, es decir cuando la superficie del fruto tomó una coloración roja. Se realizaron cinco muestreos destructivos con cuatro repeticiones cada 30 días (16, 46, 76, 106, y 136 ddt) para evaluar las variables que se describen a continuación.

### **3.7. Variables respuesta**

En esta investigación se obtuvieron diferentes variables para poder evaluar el efecto de la temperatura del aire en la fenología, morfología, y fisiología del cultivo, así como en los parámetros e índices de crecimiento vegetal.

### **3.7.1. Variables derivadas de la temperatura del aire**

Con los datos de  $T_a$  diaria registrada cada 15 min con los sensores electrónicos de temperatura en cada ambiente, se calcularon variables que fueron útiles para evaluar el efecto que tiene  $T_a$  con el resto de las variables y parámetros evaluados en esta investigación; las variables derivadas de la temperatura fueron: temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ); temperatura mínima ( $T_{m\acute{i}n}$ ); Temperatura media ( $T_{med}$ ); oscilación térmica (OT), que se obtiene de la diferencia entra la  $T_{m\acute{a}x}$  y la  $T_{m\acute{i}n}$ ; temperatura diurna ( $T_{diurna}$ ); temperatura nocturna ( $T_{nocturna}$ ), y DIF, que es la diferencia entre la  $T_{diurna}$  y la  $T_{nocturna}$ .

#### **3.7.1.1. Temperatura base**

La temperatura base ( $T_b$ , °C) o temperatura mínima de crecimiento de cultivo se calculó de acuerdo con Goudriaan y Van Laar (2012) quienes establecen una relación entre el inverso de la duración transcurrida entre dos etapas de desarrollo y la temperatura del aire. En esta investigación se estableció la relación lineal entre el inverso de los ddt a floración ( $DFL^{-1}$ ) y la temperatura media de los ambientes evaluados.  $T_b$  fue la temperatura cuando  $DFL^{-1} = 0$ .

Se realizó una extrapolación lineal ( $y = a + bx$ ) de la curva a bajas temperaturas hasta encontrar la intersección con el eje de temperatura, en donde “ $y$ ” es el inverso de los días a floración ( $DF^{-1}$ ) y “ $x$ ” la  $T_{media}$ . Esta intersección se denomina  $T_b$  para el desarrollo, es decir, cuando “ $y$ ” toma un valor de 0. Por encima de esta temperatura, la tasa de desarrollo es prácticamente proporcional a  $T_a - T_b$ .

### **3.7.2. Variables fenológicas**

Se contaron los ddt cuando más de la mitad (50 % +1) de las plantas se encontraban en los siguientes eventos fenológicos: floración o aparición de la primera flor (DFL); fructificación o amarre del primer fruto (DFR) y madurez fisiológica del primer fruto (DM) cuando los frutos tomaron una coloración rojiza. La caracterización y forma de medición de los eventos fenológicos se realizó empleando los descriptores para *Capsicum* (IPGRI, 1995).

### 3.7.2.1. Grados día de desarrollo

Para calcular los grados día de desarrollo (gdd) se utilizó el método propuesto por Manrique y Hodges (1989):

$$\text{gdd} = 0 \text{ cuando } T_{\text{media, 24 h}} < T_b$$

$$\text{gdd} = K \cdot \left[ 1 - \left( T_{\text{media, 24 h}} - T_b \right)^2 / \left( T_{\text{ópt}} - T_b \right)^2 \right] \text{ cuando } T_b \leq T_{\text{media, 24 h}} < T_{\text{ópt}}$$

$$\text{gdd} = K \cdot \left[ 1 - \left( T_{\text{media, 24 h}} - T_{\text{ópt}} \right)^2 / \left( T_{\text{mc}} - T_{\text{ópt}} \right)^2 \right] \text{ cuando } T_{\text{ópt}} \leq T_{\text{media, 24 h}} < T_{\text{mc}}$$

$$\text{gdd} = 0 \text{ cuando } T_{\text{media, 24 h}} \geq T_{\text{mc}}$$

donde:  $T_{\text{media}}$  en 24 h, es la temperatura media del aire diaria ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_b$ , es la temperatura mínima de crecimiento ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{ópt}}$ , es la temperatura óptima de crecimiento ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{mc}}$ , es la temperatura máxima de crecimiento ( $^{\circ}\text{C}$ );  $K$  es un factor de escala, se considera  $K = 10$  (valor estándar).

Los valores empleados para el cálculo fueron los reportados en la literatura específicos para *Capsicum annuum* L.,  $T_{\text{mc}} = 35$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{ópt}} = 24$   $^{\circ}\text{C}$ ; y para el valor de  $T_b$  se usó el valor obtenido descrito en 3.7.1.1. que fue 10.8  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.7.3. Variables fisiológicas

#### 3.7.3.1. Acumulación y distribución de biomasa

En cada muestreo se determinó la biomasa seca (g) de los diferentes órganos de la planta (hojas, tallos, raíces y frutos) de 4 plantas (repeticiones) por tratamiento tomadas al azar. Las plantas se seccionaron y colocaron en bolsas de papel, identificadas previamente para posteriormente secarse a 70  $^{\circ}\text{C}$  durante 72 h o hasta alcanzar peso constante en una estufa de convección forzada marca FELISA<sup>®</sup>. Una vez que el material se secó, se pesó cada órgano en una balanza modelo PT600 marca SARTORIUS<sup>®</sup> con precisión de 0.01 g.

### **3.7.3.2. Fracción de fotoasimilados enviados a formación de órganos**

En función de la biomasa seca total por planta (BSP), se calculó en porcentaje (%) la fracción de fotoasimilados asignados a la formación de cada órgano vegetal: hojas (BSH), tallos (BST), raíces (BSR) y frutos (BSF).

### **3.7.4. Variables Morfológicas**

#### **3.7.4.1. Altura de la planta y altura de bifurcación del tallo**

La altura (Alt, cm) se midió desde el cuello (región del eje de la planta que constituye el límite anatómico entre raíz primaria y el hipocótilo) hasta el ápice de la planta (último nudo), también se registró la altura desde el cuello hasta la primera bifurcación del tallo (Altbif, cm).

#### **3.7.4.2. Número de hojas y área foliar**

Se contó el número de hojas verdes (fotosintéticas) en cada fecha de muestreo y se midió el área foliar (AF, cm<sup>2</sup>) una vez que las hojas se separaron de los tallos. Se empleó un integrador modelo LI-300 (LI-COR<sup>®</sup>, Inc., Lincoln NE, USA).

### **3.7.5. Índices de eficiencia fisiológica**

El crecimiento vegetal se analizó mediante el cálculo de índices de eficiencia fisiológica, los cuales fueron calculados a partir del contenido de biomasa seca de la planta completa o de sus diferentes órganos, así como el área foliar. Estos índices tienen significado biológico y muestran que un ambiente particular o manejo es o no más conveniente.

#### **3.7.5.1. Tasa de crecimiento relativo**

La tasa de crecimiento relativo (TRC, g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>) expresa el crecimiento en términos de la tasa de incremento en tamaño por unidad de tamaño. Normalmente, se calcula con el total de



biomasa seca. Esto permite comparaciones más equitativas que una tasa de crecimiento absoluta (Hunt, 1978). La TRC se calcula con la función:

$$TRC = \frac{(\log_e W_2 - \log_e W_1)}{(t_2 - t_1)}$$

donde  $W_1$  y  $W_2$  son los pesos de biomasa seca total (g/planta) en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente.

### 3.7.5.2. Tasa absoluta de crecimiento

La tasa absoluta de crecimiento (TAC, g d<sup>-1</sup>) es un índice simple del crecimiento de la planta; es la tasa del cambio en tamaño, un incremento en tamaño por unidad de tiempo, es comúnmente aplicado al total de biomasa seca o al total de área foliar por planta (Hunt, 1978). La TAC se expresa en g d<sup>-1</sup> y se calcula mediante la fórmula:

$$TAC = \frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)}$$

### 3.7.5.3. Tasa de asimilación neta

La tasa de asimilación neta (TAN, g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), es una medida de la eficiencia del follaje, que equivale a la tasa de incremento en el peso de la planta por unidad de área foliar y por unidad de tiempo; (Hunt, 1978).

$$TAN = \frac{(W_2 - W_1) (\ln A_2 - \ln A_1)}{t_2 - t_1}$$

### 3.7.5.4. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF, m<sup>2</sup> hoja por m<sup>-2</sup> del suelo) es un índice de la frondosidad de un cultivo, o más estrictamente del área del terreno sobre la cual se encuentra, efectivamente

representa la cantidad promedio de capas completas de material de hoja exhibidas por el cultivo (Hunt, 1978). Se calcula con la siguiente función.

$$IAF = \frac{(\text{Área foliar}) * (\text{Densidad de población})}{\text{Área sembrada}}$$

### **3.8. Parámetros fisiológicos**

#### **3.8.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética**

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR, g MJ<sup>-1</sup>) se calcula como la tasa de cambio en la producción de biomasa seca (g m<sup>-2</sup>) en función de RFA acumulada (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).

La EUR se calculó con base en el modelo de Monteith (1972) para calcular la acumulación de biomasa:

$$\text{Biomasa acumulada} = \text{EUR} * \text{FRAI} * \text{RFA}$$

$$\text{EUR} = \frac{\text{Biomasa}}{\text{FRFAI} * \text{RFA}}$$

#### **3.8.2. Área foliar específica**

El Área foliar específica (AFE, m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) es una medida de la densidad o de la delgadez relativa, porque se obtiene a partir del área de las hojas en relación con su biomasa seca. Se determinó con la función propuesta por Hunt (1978).

$$\text{AFE} = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Biomasa}}$$

### **3.9. Análisis estadístico de datos**

Las variables se procesaron con el paquete estadístico RStudio<sup>®</sup>. Los datos fueron analizados estadísticamente con la prueba de “t” de student, se realizaron comparaciones por pares ( $\alpha \leq 0.05$ ) entre ambientes para las medias de las variables evaluadas. Además, se obtuvieron

correlaciones de Pearson entre las variables respuesta y parámetros obtenidos con cada una de las variables derivadas de la temperatura del aire.

A las variables de conteo (número de hojas, flores y frutos) se les aplicó una transformación logarítmica antes del análisis estadístico con el propósito de lograr homogeneidad en los resultados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Irradiancia solar

La prueba de “t” de student indicó que el porcentaje de radiación solar diaria transmitida por el plástico es estadísticamente similar (Cuadro 1). El coeficiente de variación (CV) fue alto entre fechas debido a variaciones en la nubosidad a lo largo del experimento; esta inestabilidad o fluctuación, puede representar un factor importante en la radiación solar que incide sobre una superficie (Chang *et al.*, 2017).

La cantidad de radiación solar recibida en una superficie es importante en la actividad agrícola, debido a que los procesos fisiológicos y el crecimiento de los cultivos dependen en gran medida de la cantidad de energía disponible (Kjaersgaard *et al.*, 2007).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos y prueba de medias de la irradiancia solar diaria transmitida por el plástico ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) e incidente sobre las plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México durante el año 2017.

Fecha de cultivo	Media	Mediana	S	CV (%)
f1 (26/05/2017 al 09/10/2017)	18.0 a	18.7 a	5.4	30
f2 (02/06/2017 al 16/10/2017)	17.9 a	18.5 a	5.3	30
f3 (10/06/2017 al 24/10/2017)	17.7 a	17.9 a	5.1	29

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha = 0.05$ ); S: desviación estándar; CV: Coeficiente de variación.

Además de las condiciones de temperatura, la radiación solar disponible es otro factor decisivo para el éxito de un cultivo (Perin *et al.*, 2018). En general, el umbral de radiación mínimo indicado para algunos cultivos de hortalizas tropicales y subtropicales es de  $8.46 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  (FAO, 2013).

## 4.2. Temperatura del aire (Ta)

La temperatura media (Tmed) del aire registrada en la estación meteorológica fue  $17.0 \pm 0.15$  °C (Cuadro 2) lo cual fue inferior al rango óptimo de crecimiento de 21 a 35 °C para *Capsicum annuum* (Mercado *et al.*, 1997). A excepción de la Tmed de  $19.4 \pm 0.2$  °C en A33, en los demás ambientes la Tmed se presentó en el rango óptimo de crecimiento ( $21.6 \pm 0.26$  en A40, y  $21.8 \pm 0.1$  °C en A42) con Tmed hasta 4 °C mayor que la reportada en la estación meteorológica. La temperatura es un factor abiótico que influye en el desarrollo de los órganos de la planta y fuera del rango de crecimiento causa estrés abiótico con consecuencias en el rendimiento y la calidad de los productos agrícolas (Mansour-Gueddes *et al.*, 2010; Ipek *et al.*, 2007).

La Tmáx fue  $32.93 \pm 0.30$  °C en A33,  $40.56 \pm 0.55$  °C en A40 y  $42.03 \pm 0.05$  °C en A42, lo que fue de 8.9 °C a 18 °C mayor que el valor registrado en la estación meteorológica. Estudios previos han demostrado que el cultivo de chile responde negativamente a temperaturas superiores a los 35 °C porque es superior a la temperatura óptima de crecimiento (Godawatte *et al.*, 2011), por lo que el desarrollo y rendimiento de frutos y semillas disminuyen (Thuy y Kenji, 2016). En esta investigación los tratamientos A40 y A42 presentaron Tmáx mayores a 35 °C.

Al ser Tmáx la variable usada para definir los tratamientos experimentales, en la Figura 1 se muestran las diferencias entre medias de Tmáx en los tratamientos evaluados durante los tres experimentos, en donde, de acuerdo a la desviación estándar de los datos es posible observar que en los ambientes de cultivo en invernadero los registros más altos de temperatura fueron de hasta  $48.9 \pm 0.1$  °C en A40 y  $49.9 \pm 1.4$  °C en A42, superando la media del rango óptimo para el crecimiento del cultivo.

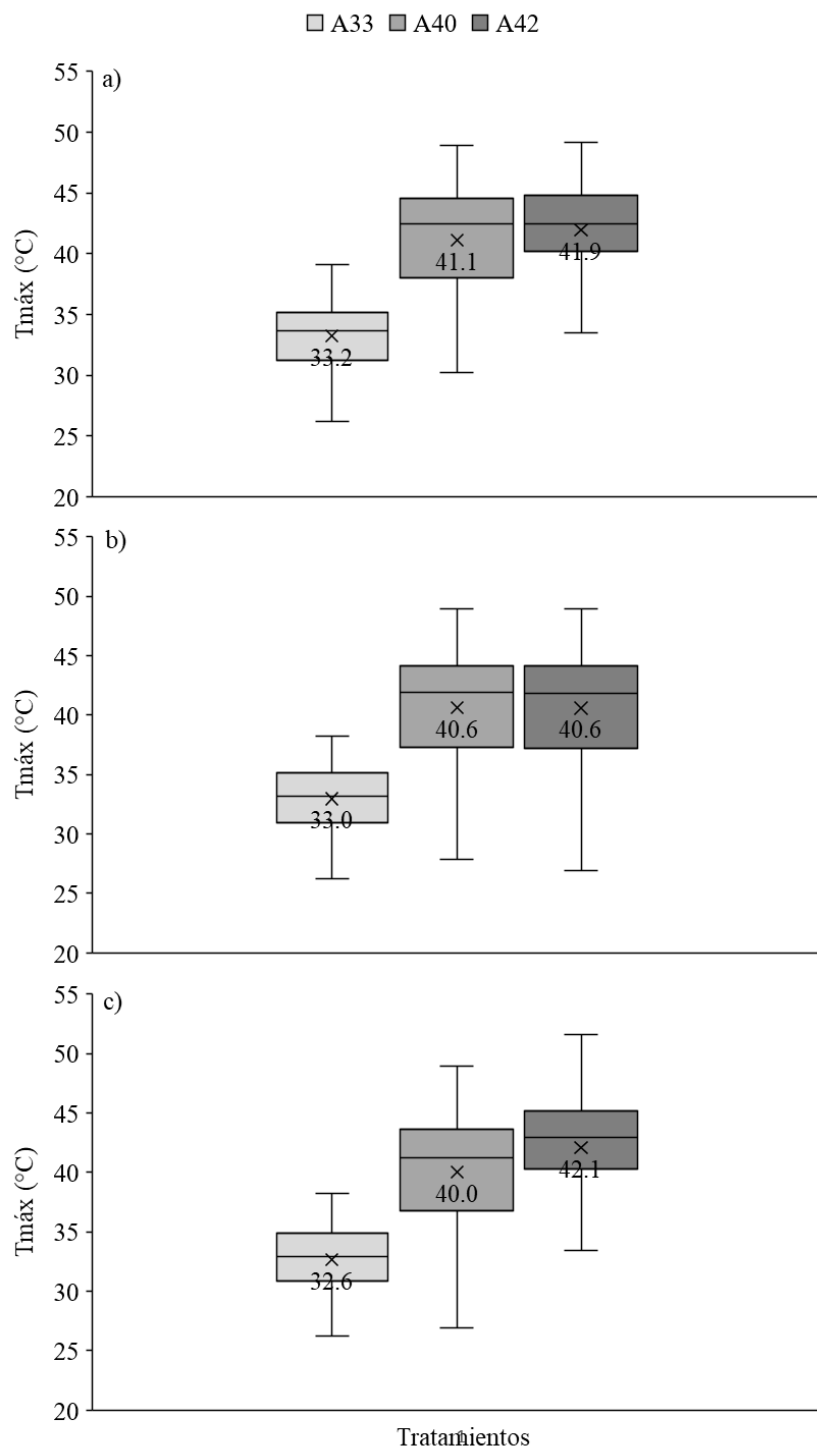


Figura 1. Promedio de temperatura máxima (Tmáx, °C) en los ambientes A33 (□), A40 (▒) y A42 (■) en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

La  $T_{mín}$  fue similar entre ambientes, entre experimentos y aún con la  $T_{mín}$  reportada en la estación meteorológica ( $11.49 \pm 0.21$  °C); la  $T_{mín}$  fue menor a 15 °C considerada por Airaki *et al.* (2012) y Mercado *et al.* (1997) como el umbral bajo el cual se detiene el crecimiento, procesos metabólicos y la producción de flores y frutos de *Capsicum annuum* L. Además, afecta las tasas de respiración nocturna de la planta y puede reducir la acumulación de biomasa seca y el rendimiento del cultivo (Hatfield y Prueger, 2011). Esto indica que el chile guajillo tiene la capacidad de crecer a temperaturas menores que otras variedades de chile porque se logró obtener fruto en el estado fenológico de madurez fisiológica. Los resultados coinciden con el cálculo de  $T_b$  para el chile guajillo ( $10.8$  °C  $\pm$  1.5 °C) que fue solo 0.69 °C menor que la  $T_{mín}$ .

Se observó que la diferencia entre la  $T_{máx}$  y la  $T_{mín}$  (oscilación térmica, OT), fue menor en la estación meteorológica ( $12.5 \pm 0.11$  °C), intermedia en el ambiente A33 ( $21.6 \pm 0.15$  °C) y mayor en los ambientes A40 ( $28.9 \pm 0.4$  °C) y A42 ( $30.4 \pm 0.20$  °C).

En el Cuadro 3 se muestra que la diferencia entre la temperatura diurna y la temperatura nocturna (DIF) fue  $9.4 \pm 0.1$  °C en A33,  $12.5 \pm 0.2$  °C en A40, y  $13.2 \pm 0.01$  °C en A42, mientras que en la estación meteorológica solo fue  $3.9 \pm 0.06$  °C. Kim *et al.* (2013) consideran que DIF tiene efecto en el área foliar, biomasa en fresco por planta y biomasa seca en cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.), así como en diversas variables fisiológicas y morfológicas de tomate (Lim *et al.*, 1997) y pepino (Grimstad y Frimanslund, 1993). Aunque en esta investigación los tratamientos se definieron con base en  $T_{máx}$ , DIF es otra variable que mostró ser diferente entre tratamientos.

Cuadro 2. Medias de temperatura mínima (T<sub>mín</sub>, °C), media (T<sub>med</sub>, °C) y máxima (T<sub>máx</sub>, °C) del aire registrada en la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (EM), y con un HOBO en los ambientes evaluados (A33, A40, A42) en un experimento de análisis de crecimiento de chile guajillo cultivado en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Estado de México.

Fecha de cultivo	Temperatura (°C)	EM	A33	A40	A42
f1	T <sub>mín</sub>	11.7	11.4	11.8	11.7
	T <sub>med</sub>	17.2	19.6	21.8	21.9
	T <sub>máx</sub>	24.2	33.2	41.1	42.0
	OT	12.5	21.8	29.3	30.3
f2	T <sub>mín</sub>	11.5	11.3	11.7	11.6
	T <sub>med</sub>	17.1	19.4	21.7	21.8
	T <sub>máx</sub>	24.0	33.0	40.6	42.0
	OT	12.5	21.7	28.9	30.4
f3	T <sub>mín</sub>	11.2	11.1	11.5	11.4
	T <sub>med</sub>	16.9	19.2	21.3	21.7
	T <sub>máx</sub>	23.9	32.6	40.0	42.1
	OT	12.7	21.5	28.5	30.7

Cuadro 3. Temperatura media diurna y nocturna (°C) y DIF (°C) registrada por un HOBO en los ambientes evaluados (A33, A40, A42) en un experimento de análisis de crecimiento de chile guajillo cultivado en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Estado de México.

Fecha de cultivo	Temperatura (°C)	EM	A33	A40	A42
f1	Diurna	19.0	23.9	27.6	27.9
	Nocturna	15.0	14.4	14.9	14.7
	DIF	4.0	9.5	12.7	13.2
f2	Diurna	18.8	23.7	27.3	27.8
	Nocturna	14.9	14.3	14.8	14.6
	DIF	3.9	9.4	12.5	13.2
f3	Diurna	18.6	23.4	26.8	27.6
	Nocturna	14.6	14.1	14.5	14.4
	DIF	4.0	9.3	12.3	13.2



En la Figura 2 se muestran las curvas que describen las fluctuaciones de la temperatura del aire horaria (promedio, mínima y máxima), es decir, a lo largo de las 24 h del día, que se registró durante el experimento en los ambientes de cultivo. A42 registró mayores temperaturas en comparación con A40 y A33.

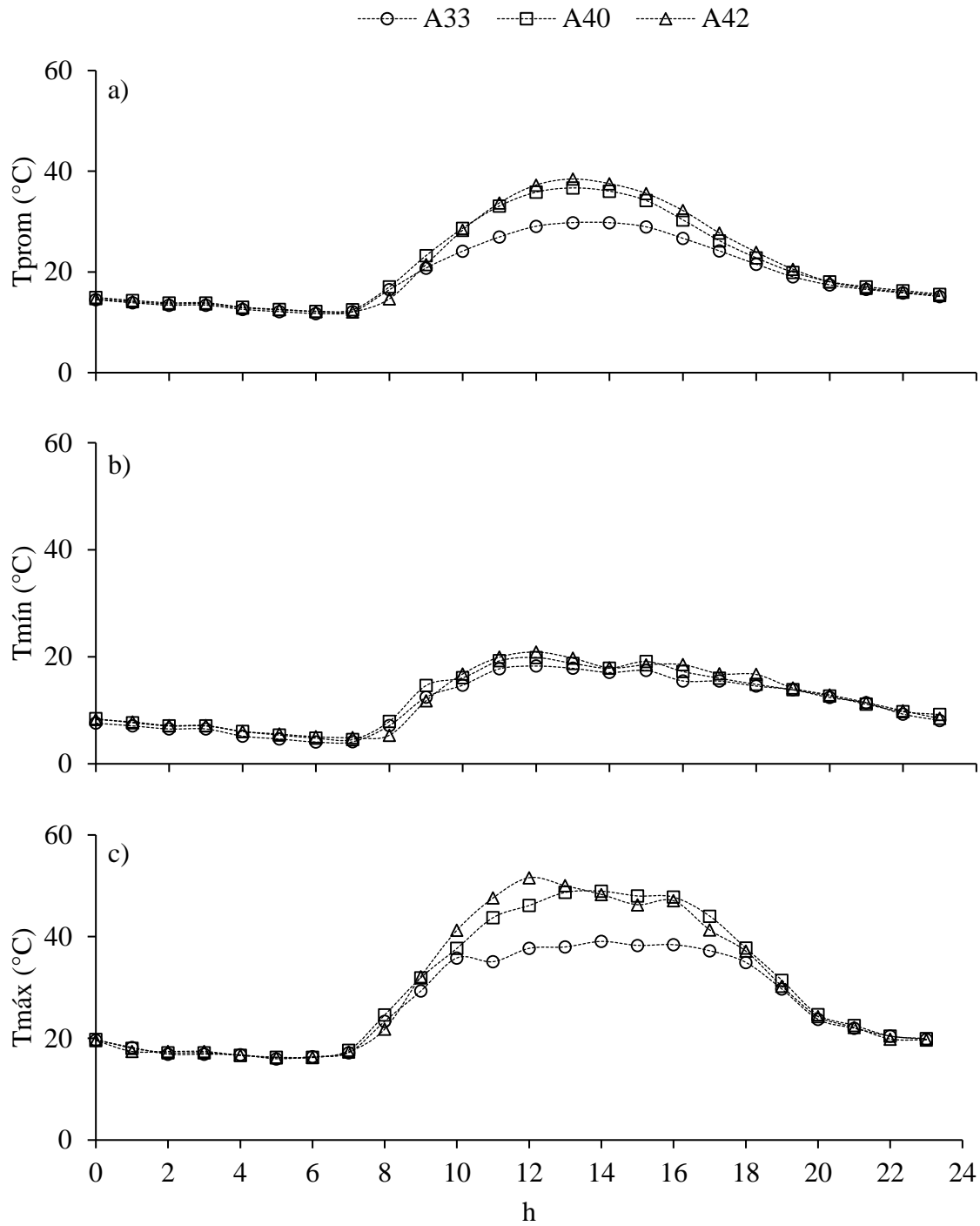


Figura 2. Temperatura promedio horaria en los ambientes A33 (-○-), A40 (-□-) y A42 (-△-) de un experimento en plantas de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo del (26/05/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

### **4.2.1. Temperatura base de crecimiento**

La  $T_b$  fue de  $10.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  que fue solo  $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que la  $T_{\text{mín}}$ , lo cual indica que cuando el ambiente de cultivo registró temperaturas por debajo de  $T_b$  el crecimiento y desarrollo de la planta se detuvo.

De acuerdo con Yang *et al.*, (1995) el concepto de temperatura base se puede describir fisiológica o estadísticamente, fisiológicamente, supone que, por debajo de cierto nivel de temperatura, el crecimiento y el desarrollo del cultivo cesará. Sin embargo, es difícil determinar la temperatura base fisiológica, y cada fase de desarrollo puede tener una temperatura base diferente. En fisiología, la temperatura base debe ser similar para una etapa de desarrollo de un cultivo determinado en cualquier temporada de crecimiento. Estadísticamente, la temperatura base es la que da como resultado la menor variación en las acumulaciones de gdd.

### **4.3. Etapas fenológicas**

La fenología de un cultivo está influenciada por la temperatura ambiental, por lo que una forma de relacionarlas son los gdd, los cuales permiten pronosticar cuando ocurrirán los principales eventos fenológicos (Díaz-López *et al.*, 2013; Martín y Jerez, 2017); gdd es una forma de asignar un valor de calor a cada día transcurrido para dar una estimación de la cantidad de crecimiento estacional que ha alcanzado la planta (Miller *et al.*, 2001).

Para estimar los gdd se usó como temperatura máxima de crecimiento  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Airaki *et al.*, 2012), como óptima de crecimiento  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Mercado *et al.*, 1997) y como temperatura base se usó el valor promedio de  $T_b$  calculado que fue de  $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En el Cuadro 4 se reportan los ddt y gdd acumulados para alcanzar los estados fenológicos en el cultivo de chile guajillo.

El valor de la media de DFL en A42 ( $15 \pm 1$  ddt) indica que las plantas alcanzaron antes la floración en este tratamiento; el aumento de la temperatura puede causar cambios en el

tiempo en que ocurren las etapas fenológicas (Solomon et al., 2007), particularmente en la etapa reproductiva (Kuo y Tsai, 1984).

La exposición de la planta a altas temperaturas provoca la abscisión de flores y frutos; temperaturas superiores a 35 °C disminuyen la respuesta de los frutos especialmente al reducir la viabilidad del polen (Taheri y Haghghi, 2018), el cual, al ser expuesto a altas temperaturas normalmente no es viable, por lo tanto, se ve afectado el proceso de microsporogénesis (Erickson y Markhart, 2002).

En cambio, los DFR en A40 fueron 6 días antes que en A42, y 3 d antes que en A33; por otro lado, las menores temperaturas en A33 causaron que tomara más tiempo la fructificación. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Garruña-Hernández et al. (2012) quienes encontraron que la floración de chile habanero ocurrió antes en un ambiente a 30 °C que en uno a 35 °C, además a esta última temperatura fue menor el número de frutos por planta debido al mayor número de flores abortadas por efecto de las temperaturas altas.

Conforme aumentó la T<sub>máx</sub>, disminuyeron los ddt a DM con una diferencia máxima entre medias de 13 días entre las plantas en A33 y A42. De forma similar, en tomate y en otros cultivos el tiempo transcurrido para la maduración de frutos es menor conforme aumenta la temperatura ambiental (Adams et al., 2001) esto considerado un mecanismo de adaptación a condiciones de estrés por altas temperaturas, que permite a la planta dispersar sus semillas más rápidamente ante condiciones subóptimas (Mizrahi, 1982).

La maduración de los frutos es un proceso complejo e irreversible que implica muchos cambios a niveles fenotípicos, estructurales y bioquímicos (Klie *et al.*, 2014); en la mayoría de las especies de *Capsicum*, la maduración se caracteriza por cambios metabólicos y visuales importantes (Chaki *et al.*, 2015). Así, además del cambio de color típico que ocurre en la maduración (en guajillo de verde a rojo) se desencadenan una serie de procesos como: la emisión de compuestos orgánicos volátiles asociados con la respiración, el metabolismo es altamente intenso, destrucción de clorofilas, síntesis de nuevos pigmentos (carotenoides,

xantofilas y antocianinas), formación de pectinas, se producen proteínas de síntesis y la alteración del sabor (Markus *et al.*, 1999; Palma *et al.*, 2011)

Cuadro 4. Fenología del cultivo de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en función de días después del trasplante (ddt) y grados día de desarrollo (gdd) en un experimento establecido tres fechas de cultivo (f1 del 26/05/2017 al 09/10/2017, f2 del 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3 del 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Fecha de cultivo	Ambiente	DFL		DFR		DM	
		ddt	gdd	ddt	gdd	ddt	gdd
f1	A33	21	199.8	50	448.2	111	972.7
	A40	18	176.2	45	433.8	101	970.7
	A42	15	147.8	48	463.6	99	955.1
f2	A33	19	181.7	52	456.9	108	945.0
	A40	15	147.6	43	414.2	96	921.1
	A42	14	138.2	46	444.1	92	887.5
f3	A33	20	185.4	49	423.1	109	947.5
	A40	17	167.8	45	431.0	100	950.9
	A42	16	156.8	47	448.9	98	937.5
Media		17.2	166.8	47.2	440.4	101.6	943.1
S		2.4	20.6	2.8	16.1	6.4	26.2
C.V. (%)		14%	12%	6%	4%	6%	3%

DFL: días a floración; DFR: días a fructificación; DM: días a madurez; ddt: días después del trasplante; gdd: grados día de desarrollo.

#### 4.4. Componentes del rendimiento

El número de flores y frutos contabilizados en cada muestreo (Cuadro 5 Cuadro 6 Cuadro 7) nos indican el efecto que tiene la temperatura del aire registrada en el ambiente de cultivo en la producción de frutos por planta, mostrando diferencias estadísticas ( $\alpha \leq 0.05$ ) en ambas variables a los 76 y 136 ddt para las tres fechas de siembra. En A33 se presentó menor acumulación en flores y frutos, esto es de esperarse al ser un ambiente en condiciones de intemperie en donde se registraron con mayor frecuencia temperaturas inferiores a  $T_b$ , en

cambio, en A42 el efecto de temperaturas altas registradas provocó menor número en flores y por consecuencia la disminución del número de frutos.

El rendimiento de frutos fue mayor en el ambiente A40 en las tres fechas de siembra, en promedio 24 frutos/planta a los 136 ddt, las condiciones de temperatura registradas en este ambiente fueron óptimas para favorecer el desarrollo y acumulación de los frutos.

El incremento de la temperatura del aire puede tener diversos efectos en las plantas, incluidos las alteraciones en las etapas fenológicas, particularmente en la fenología reproductiva. Por ejemplo, temperaturas más altas pueden causar una floración más temprana y más tardía, y obstaculizar la fertilización, lo que puede inhibir el cuajado de frutos (Garruña-Hernández *et al.*, 2012).

Cuadro 5. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Número de Flores			Número de frutos		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0	5 b	12 b	0	5 b	15 c
A40	0	8 a	23 a	0	8 a	22 a
A42	0	7 a	11 b	0	7 a	18 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.

Cuadro 6. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Número de Flores			Número de frutos		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0	6 b	13 c	0	7 b	13 c
A40	0	8 a	26 a	0	9 a	27 a
A42	0	7 a	20 b	0	7 b	19 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.

Cuadro 7. Medias de Número de flores/planta, Número de frutos/planta en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Número de Flores			Número de frutos		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0	4 b	14 c	0	7 b	10 c
A40	0	8 a	24 a	0	11 a	24 a
A42	0	8 a	19 b	0	8 b	13 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.

## 4.5. Variables fisiológicas

### 4.5.1. Acumulación y distribución de biomasa

El rendimiento total de biomasa seca de los cultivos depende del tamaño del dosel foliar, la velocidad a la que funciona la hoja (eficiencia) y el tiempo que el dosel persiste (duración). La acumulación de biomasa seca se usa comúnmente como parámetro para caracterizar el crecimiento porque tiene una gran importancia económica (Tekalign y Hammes, 2005b).

La cinética de acumulación de biomasa seca en los ambientes de crecimiento correspondió a una curva de tipo sigmoidea (Figura 3) y se ajustó a un modelo Gompertz, tal como ocurrió en una investigación previa con el mismo material vegetal de chile guajillo por Ayala-Villegas (2012) y como ocurre en otros cultivos como: chile jalapeño (Azofeifa y Moreira, 2008), tomate (Casierra-Posada *et al.*, 2007), calabacita (Sedano-Castro *et al.*, 2005).

El incremento de biomasa seca en los tres ambientes de cultivo fue lento hasta los 46 ddt, a partir de entonces incrementó exponencialmente, coincidiendo con el inicio de fructificación. En el primer experimento (f1) las plantas no alcanzaron la fase estacionaria debido a que al momento de concluir el experimento los órganos de la planta aún estaban en crecimiento. En

cambio, en los demás experimentos fue notable la estabilización de la curva de BSP a partir de los 106 ddt.

Se obtuvieron diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ) para la acumulación de biomasa seca total ( $\text{g.m}^{-2}$ ) donde la mayor acumulación se presentó consistentemente en las tres fechas de siembra en el ambiente de cultivo A40 (f1, 280.86; f2, 358.25 y f3, 319.48  $\text{g.m}^{-2}$ ), que fue de 11 a 29 % mayor que la producida en A42 y de 27 a 48 % mayor que la producida en A33. Esta misma tendencia se observó en BSH y BST sobre todo en el segundo (f2) y tercer experimento (f3), aunque a menudo la diferencia solo era en los valores de la BSH y BST que fueron hasta 48 y 61 % mayor en plantas cultivadas en A40 que en los valores de estas variables en los otros ambientes de crecimiento. Con respecto a la BSR, solo se observaron diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ) en el último muestreo destructivo (136 ddt) de f2 y f3, y en el muestreo destructivo a los 76 ddt de f1, en los cuales el ambiente A40 causó en general 25 % mayor BSR que en los otros ambientes. El comportamiento de la BSF es consistente con lo observado en las variables anteriores; en A40 se obtuvo en general un valor mayor en esta variable (10 a 72 %) que en los otros ambientes, pero sólo en los experimentos f2 y f3 porque en el experimento en f1 las diferencias de BSF entre ambientes no fueron significativas ( $\alpha > 0.05$ ).

Resultados de otras investigaciones indican que la temperatura del aire afecta la biomasa acumulada de diferentes cultivos; los cambios crecientes en la temperatura del aire en relación con la temperatura óptima de crecimiento, es decir, temperaturas extremas, se relacionan con la disminución de biomasa seca (Lefsrud *et al.*, 2005). Se ha demostrado que temperaturas promedio mayores de 34 °C provocan una marcada reducción en la productividad de la planta de pimiento (Erickson y Markhart, 2002) que pueden estar relacionadas con cambios en la asignación de carbono causados por el aumento de los costos respiratorios (Martin y Stutz, 2004) y por la desnaturalización enzimática (Ipek *et al.*, 2007); mientras que la temperatura mínima del aire afecta las tasas de respiración nocturna de la planta y puede reducir la acumulación de biomasa y el rendimiento del cultivo (Hatfield y Prueger, 2011).



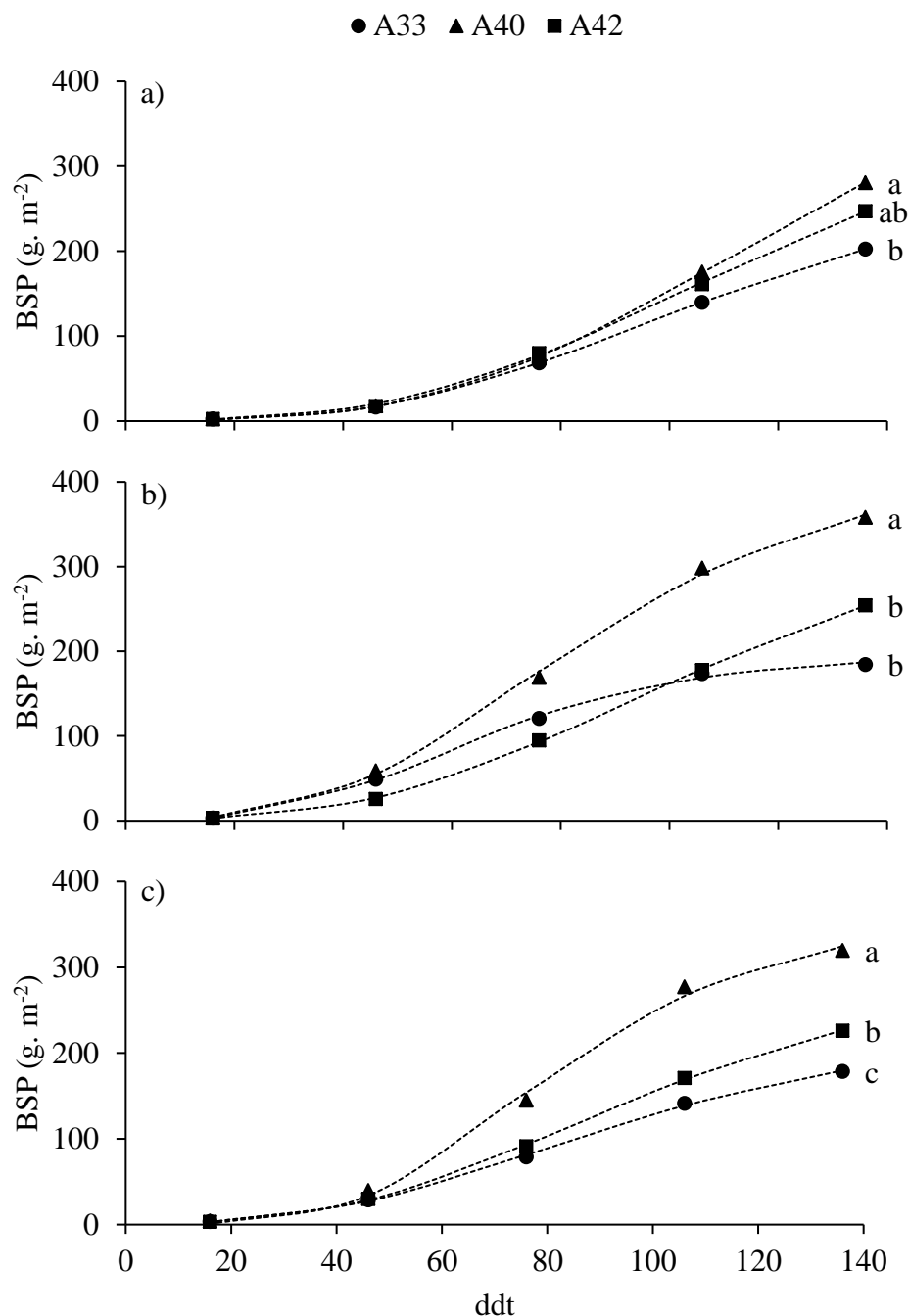


Figura 3. Medias de Biomasa Seca Total (BST, g.m<sup>-2</sup>) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●-), A40 (-▲-) y A42 (-■-), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. Medias con letras iguales son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha = 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.

Modelos de ajuste para cinética de acumulación de biomasa: f1, A33:  $y = 300.8 * \exp(-\exp(2.06 - 0.02x))$  (R = 0.99, SE = 1.0), A40:  $y = 525.4 * \exp(-\exp(2.09 - 0.018x))$  (R = 0.99, SE = 1.05), A42:  $y = 412.4 * \exp(-\exp(2 - 0.019x))$  (R = 0.99, SE = 2.94); f2, A33:  $y = 196.5 * \exp(-\exp(2.05 - 0.037x))$  (R = 0.99, SE = 4.47), A40:  $y = 426.2 * \exp(-\exp(2 - 0.027x))$  (R = 0.99, SE = 8.06), A42:  $y = 377.5 * \exp(-\exp(1.93 - 0.021x))$  (R = 0.99, SE = 1.93); f3, A33:  $y = 230.5 * \exp(-\exp(1.8 - 0.023x))$  (R = 0.99, SE = 2.96), A40:  $y = 362.7 * \exp(-\exp(2.43 - 0.034x))$  (R = 0.99, SE = 11.97), A42:  $y = 304.07 * \exp(-\exp(1.92 - 0.023x))$  (R = 0.99, SE = 2.43) ; donde “y” es BSP y “x” es ddt.

Cuadro 8. Medias de la biomasa seca (g/planta) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	BSH			BST			BSR			BSF		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0.28 a	4.9 a	7.3 b	0.11 a	3.7 a	9.0 b	0.11 a	1.3 b	3.0 a	0	3.8 a	21.0 a
A40	0.29 a	3.7 a	11.9 a	0.12 a	4.0 a	15.9 a	0.11 a	1.7 a	3.8 a	0	5.4 a	24.5 a
A42	0.34 a	5.5 a	11.7 a	0.11 a	4.3 a	10.2 b	0.11 a	1.3 b	2.2 a	0	4.8 a	25.3 a

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.; BSH: biomasa seca de hojas (g); BST: biomasa seca de tallos (g); BSR: biomasa seca de raíz (g); BSF: biomasa seca de frutos (g).

Cuadro 9. Medias de la biomasa seca (g) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	BSH			BST			BSR			BSF		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0.34 a	6.3 c	7.5 c	0.16 ab	5.2 b	9.2 b	0.17 a	2.9 a	4.6 a	0	10.7 a	15.3 b
A40	0.32 a	9.6 a	14.6 a	0.17 a	8.8 a	21.2 a	0.14 a	3.5 a	4.3 a	0	11.9 a	31.1 a
A42	0.37 a	8.2 b	10.9 b	0.11 b	6.1 b	8.7 b	0.12 a	1.3 a	3.4 b	0	3.3 b	27.2 a

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.; BSH: biomasa seca de hojas (g); BST: biomasa seca de tallos (g); BSR: biomasa seca de raíz (g); BSF: biomasa seca de frutos (g).

Cuadro 10. Medias de la biomasa seca (g) de hojas (BSH), tallo (BST), raíz (BSR) y frutos (BSF) en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	BSH			BST			BSR			BSF		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	0.39 a	4.0 b	6.5 c	0.17 ab	4.2 b	7.4 b	0.13 a	2.7 a	3.2 b	0	4.4 b	18.1 c
A40	0.50 a	7.6 a	12.6 a	0.22 a	7.2 a	19.1 a	0.14 a	1.9 a	4.3 a	0	12.4 a	27.5 a
A42	0.41 a	5.1 b	8.4 b	0.11 b	4.3 b	8.9 b	0.11 a	1.7 a	3.3 b	0	7.2 ab	24.6 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.; BSH: biomasa seca de hojas (g); BST: biomasa seca de tallos (g); BSR: biomasa seca de raíz (g); BSF: biomasa seca de frutos .

Se ha demostrado que la temperatura es un factor importante que afecta el desarrollo de las plantas, el incremento de la temperatura puede tener un impacto en el rendimiento y la productividad, sin embargo, estudios realizados en ambientes controlados afirman que temperaturas altas afectan en el desarrollo fenológico del cultivo, pero, no se reportan efectos en algunas variables incluso fisiológicas como la biomasa vegetativa, comparado con las temperaturas normales (Hatfield y Prueger, 2015). No obstante, Adams, *et al.* (2001) encontró diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.01$ ) de que la temperatura afecta la acumulación de biomasa seca en cultivo de tomate, pero, no en la distribución de biomasa seca a los órganos.

La asimilación de biomasa seca y su distribución dentro de la planta, son procesos importantes que determinan la productividad del cultivo; el estudio de los patrones de asignación de biomasa seca hacia las diferentes partes de la planta, la variabilidad de estos patrones entre cultivares y el efecto de las condiciones ambientales en el proceso, pueden ayudar a maximizar la productividad y a seleccionar cultivares para un propósito particular (Tekalign y Hammes, 2005a)

El desarrollo de los frutos tiene un efecto considerable en el crecimiento de otros órganos de la planta de tal manera que al aumentar la carga de fruta se reduce el crecimiento de raíces, brotes y hojas (Marcelis, 1992).

La proporción de biomasa seca por órgano (%) es un indicador de cómo la temperatura afecta cada en cada órgano de la planta (Garruña *et al.*, 2014). En este caso, la proporción de biomasa seca de las plantas de chile guajillo cambió en cada etapa fenológica (Figura 4, 5 y 6). En el último muestreo destructivo de biomasa seca (136 ddt), la mayor fracción de biomasa seca se asignó a frutos siendo éstos los órganos que presentaron mayor capacidad de demanda de fotoasimilados y la menor fracción fue para raíces; en general las plantas acumularon más biomasa seca en los órganos reproductivos que en los vegetativos.

La mayor acumulación de biomasa en hojas se observó consistentemente en A42 ( $\alpha = 0.05$ ). En cambio, no se observó una tendencia clara de los tratamientos en la BS de tallo, raíz y frutos a través del tiempo.

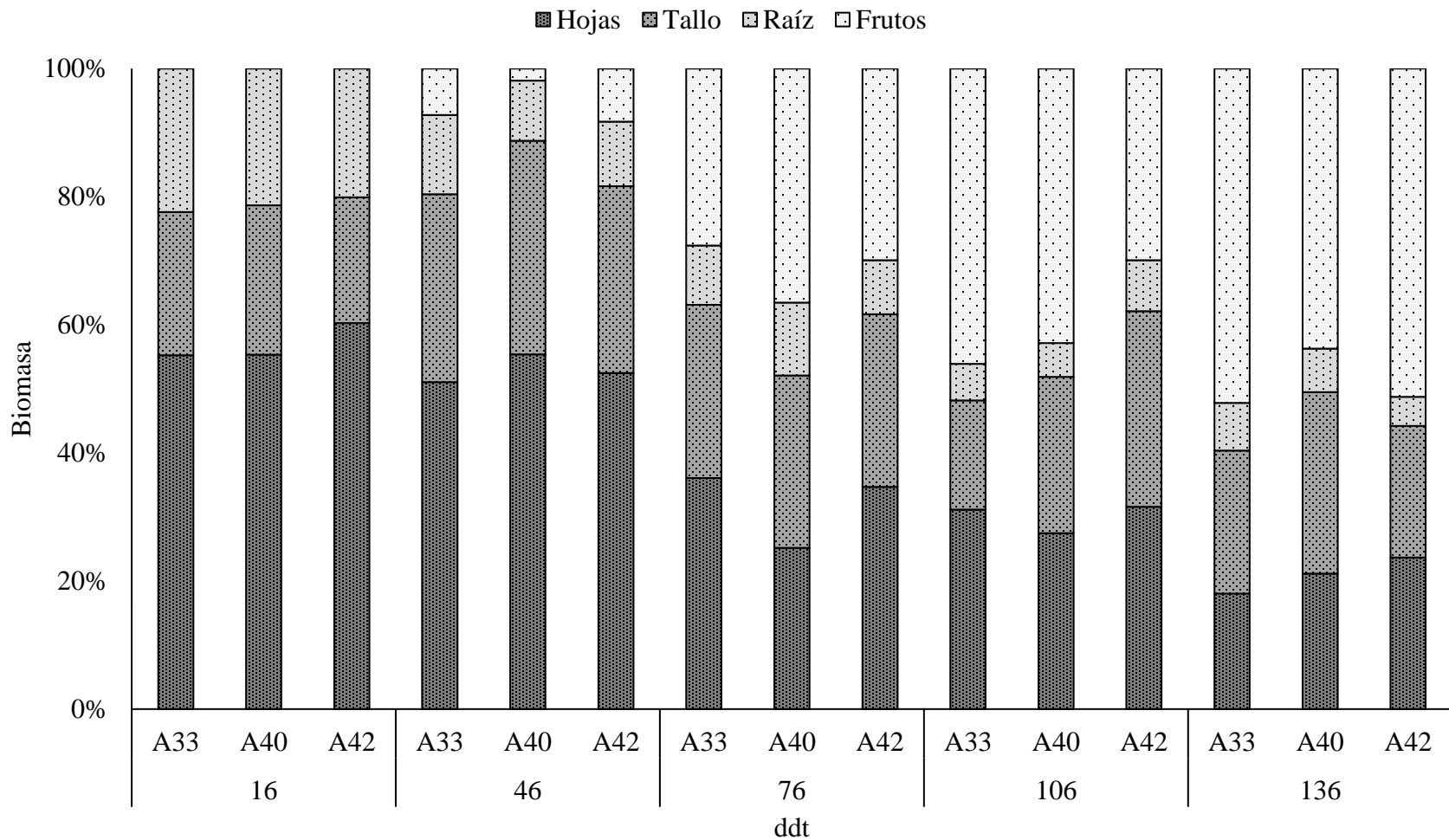


Figura 4. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz □ y frutos □ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

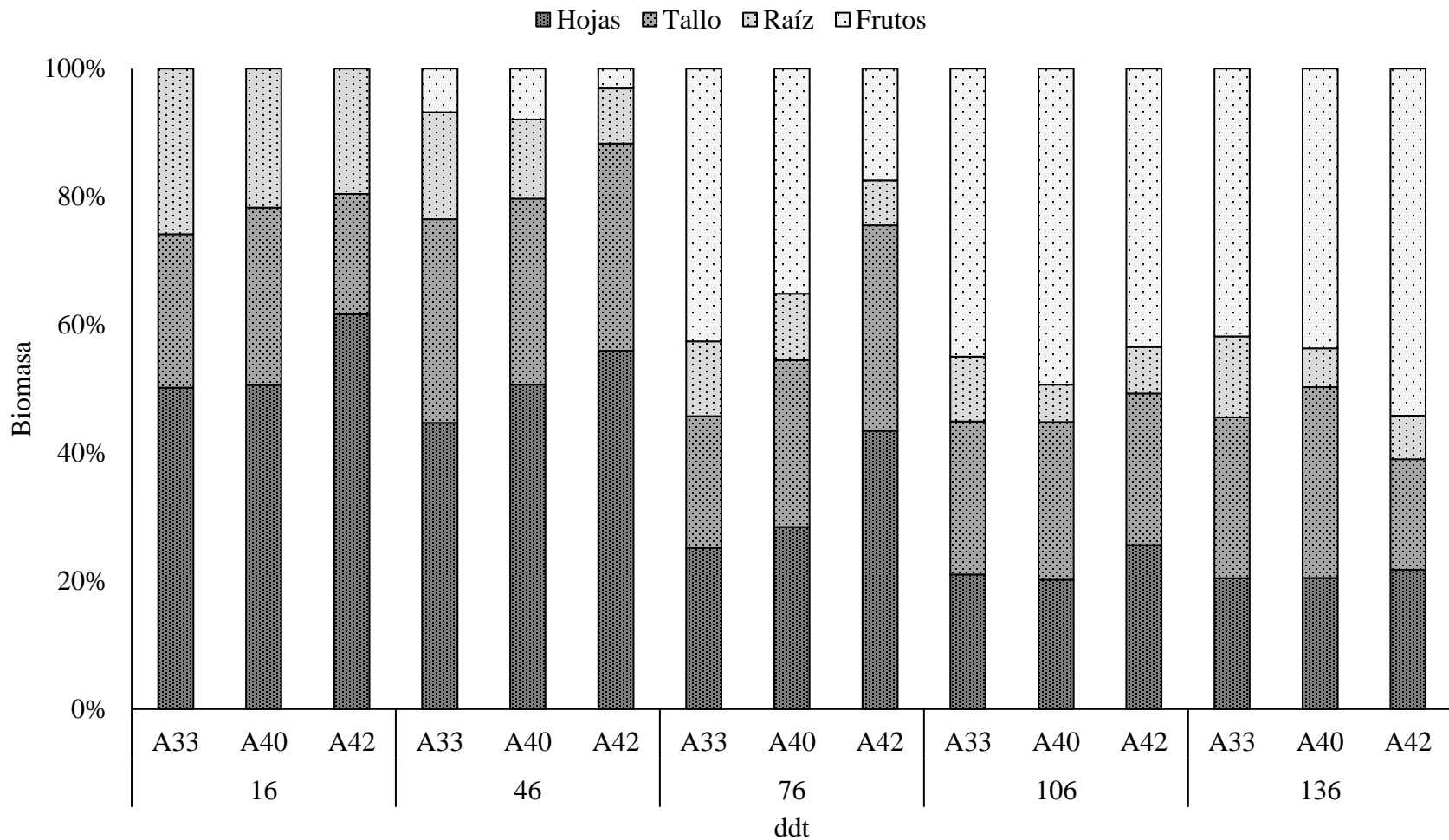


Figura 5. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz □ y frutos ▨ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

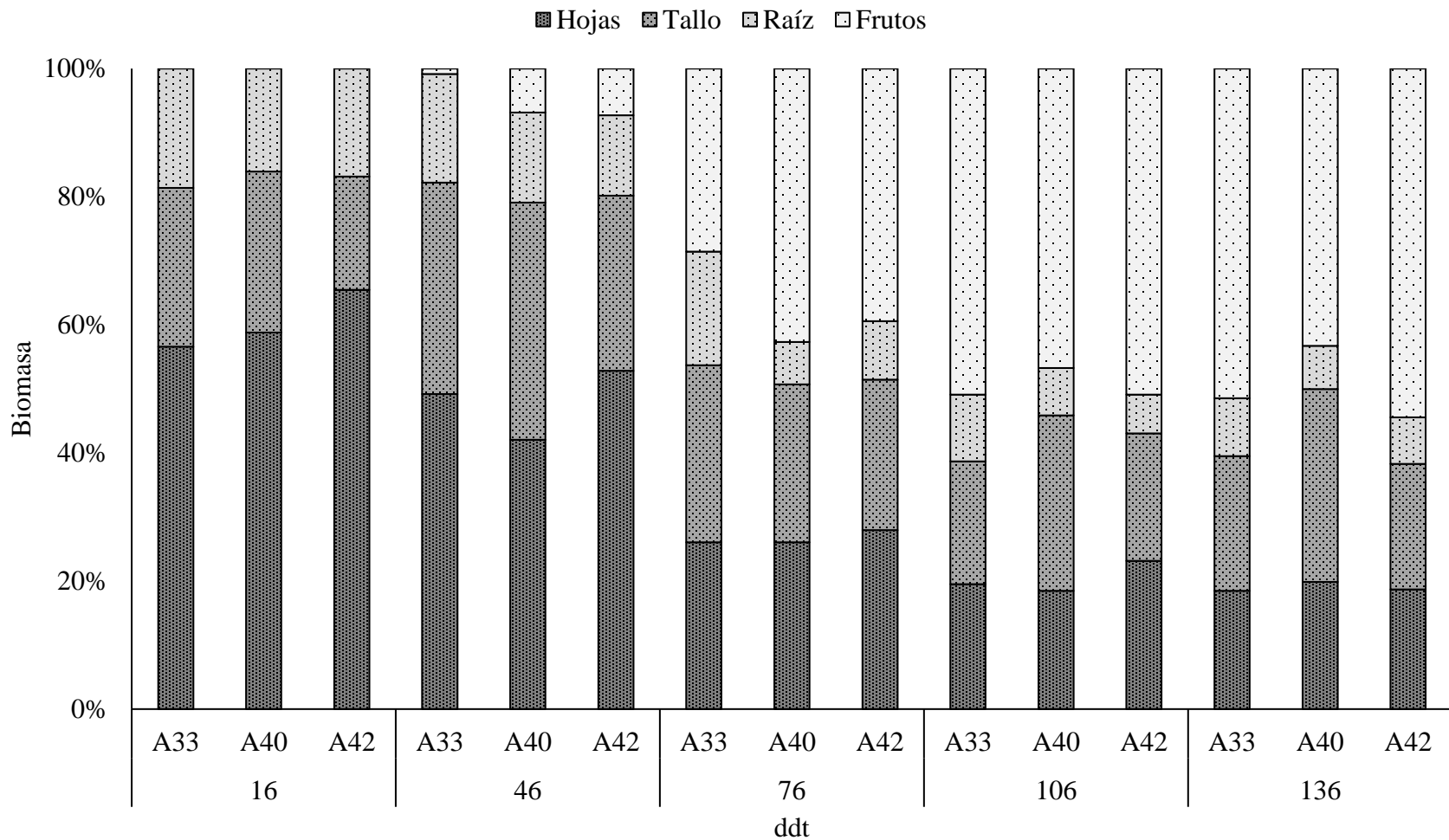


Figura 6. Porcentaje de fotosintatos enviados a hojas ■, tallos ■, raíz □ y frutos ▨ de plantas de chile guajillo (*Capsicum annum* L.) en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.



## **4.6. Variables morfológicas**

La temperatura del aire es un factor ambiental que se ha relacionado con el crecimiento y desarrollo de las plantas de Chile, esta relación se ha evaluado en condiciones de invernadero, en donde es posible tener un mayor control. Resultados de otras investigaciones han demostrado que la temperatura del ambiente de cultivo influye directamente en las variables morfológicas de las plantas (De Swart *et al.*, 2010).

Los resultados de las variables morfológicas evaluadas en relación al ambiente de cultivo se muestran en los Cuadros 11, 12 y 13 respectivamente.

### **4.6.1. Altura de la planta**

La máxima altura que alcanzó el cultivo fue de 93 cm en el ambiente de cultivo A40 en la f2. De acuerdo con la comparación de medias, se observaron diferencias ( $\alpha = 0.05$ ) entre ambientes (Figura 7), las plantas alcanzaron una altura promedio de  $70.7 \pm 16$  cm a los 136 ddt considerando los diferentes ambientes y fechas de cultivo, donde es posible observar que las mayores medias se obtuvieron en A40 que fueron 29.1 a 45.2 % mayor que en A33 y de 13.8 a 23.2 % mayor que en A42 en las f2 y f3.

La altura de la planta es un componente crucial de la estrategia ecológica de una especie vegetal, porque es fundamental para la ganancia de carbono, también, es un determinante principal de la capacidad de la planta para competir por la luz solar y además por la correlación que tiene con variables tales como área foliar, la fracción de asimilados a formación de hojas y área del dosel (Falster y Westoby, 2003).

Investigaciones previas han demostrado que la temperatura tiene una gran influencia en altura de planta en el cultivo de Chile, el estrés por altas temperaturas provoca plantas de menor tamaño y en consecuencia se ven afectadas otras variables morfológicas y fisiológicas (Song *et al.*, 2015; Taheri y Haghghi, 2018).

Godawatte *et al.*, (2011), encontraron diferencias significativas en la altura de las plantas de pimiento en función al ambiente de cultivo, en donde, aquellas cultivadas a una temperatura máxima de 34 °C fueron más altas que a 32 °C.

Las bajas temperaturas también afectan la altura de la planta, De Swart *et al.* (2010), encontraron que la altura de planta fue menor significativamente en aquellas plantas de pimiento que fueron expuestas a tratamientos con menor temperatura en comparación con las condiciones óptimas de crecimiento.

#### **4.6.2. Altura de bifurcación del tallo**

La altura de bifurcación del tallo es una fase bien definida en plantas de chile, se produce una intensa división celular en todos los órganos de la planta, iniciándose el desarrollo de los tejidos secundarios. La ramificación del tallo ocurre generalmente cuando la planta ha alcanzado de 15 a 20 cm de altura (Nuez *et al.*, 2003).

En las plantas cultivadas de este experimento la altura de bifurcación del tallo ocurrió en promedio a los 20 ddt, cuando las plantas habían alcanzado de 25 a 30 cm de altura, en esta variable, sólo se obtuvieron diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ) al concluir el experimento (136 ddt), en donde las mayores medias de esta variable se observaron en el A40 que fueron de 13.8 a 30.8 % mayores que en los otros ambientes.

La altura de la primera bifurcación del tallo se ha usado como un indicador de la precocidad del cultivo de chile ya que expresa la transición de la flor, determinada a partir de hojas cotiledóneas a esta primera bifurcación (Tarchoun y Mougou, 2009). Después de que el brote ha sido terminado con una flor o vástago floral, nuevos brotes vegetativos emergen (Nuez *et al.*, 2003).

Además de que altas temperaturas pueden influir en esta variable, el número de bifurcaciones está determinado genéticamente, (Mansour-Gueddes *et al.*, 2010), lo cual no fue considerada en el experimento.

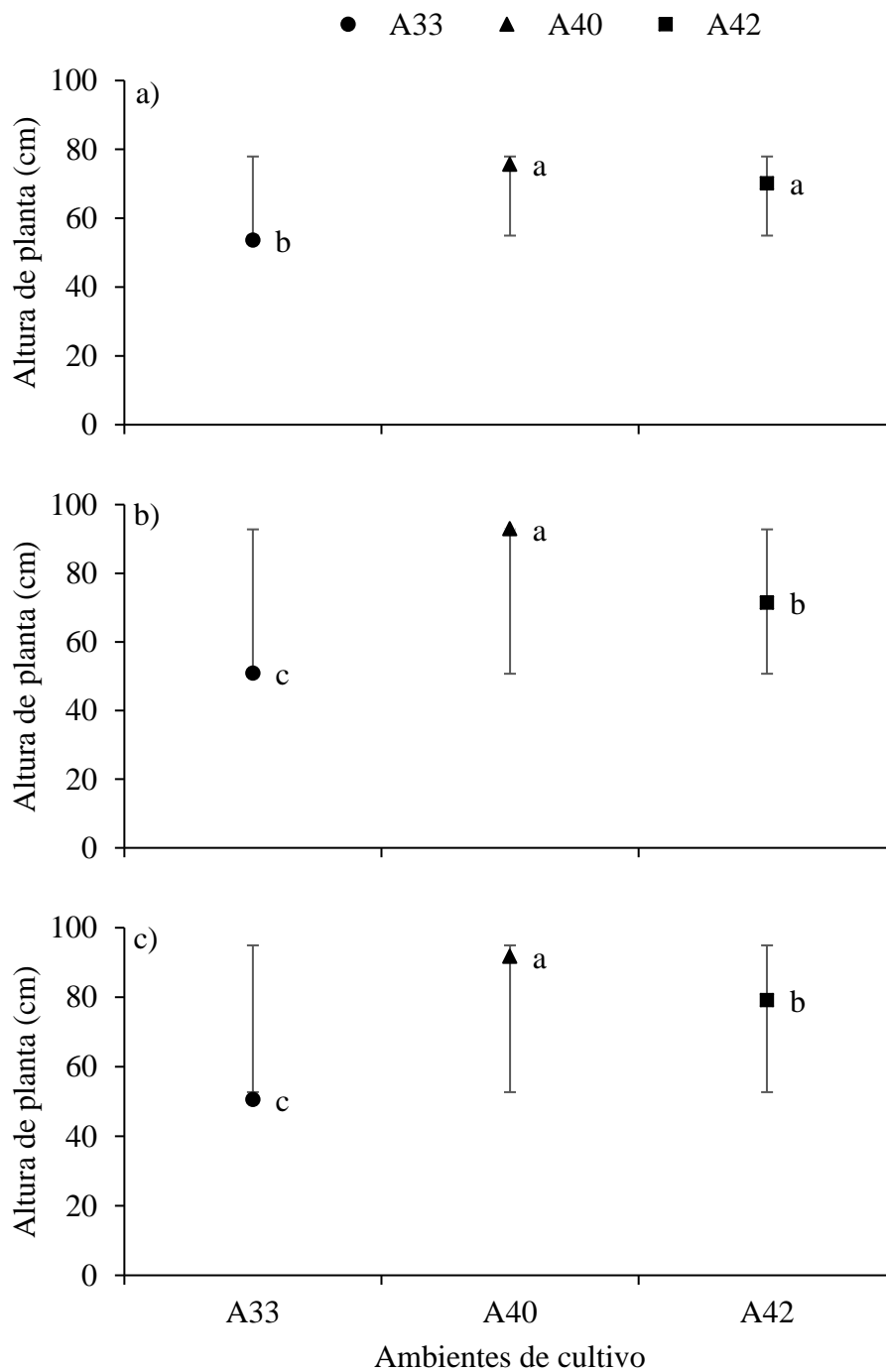


Figura 7. Medias de altura de planta (cm) a los 136 ddt en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●), A40 (▲) y A42 (■), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

### 4.6.3. Número de hojas y Área foliar

Las hojas son los principales órganos en donde se desarrolla el proceso fotosintético, por lo que el área foliar es la mejor medida para determinar la capacidad fotosintética de un cultivo determinado (Valbuena *et al.*, 2017). La determinación del área foliar tiene una gran importancia en términos de desarrollo de la planta debido a que además de conocer la capacidad fotosintética de las plantas, brinda información significativa sobre el potencial de crecimiento (Dogan *et al.*, 2018).

Al igual que en la cinética de acumulación de biomasa total (Figura 3) las plantas presentaron curvas de tipo sigmoideas en la cinética de crecimiento en área foliar, ajustadas a modelos de Gompertz, Logísticos y Morgan Morgan Finney (Figura 8) donde es notable en todos los casos fases definidas por el crecimiento: lenta, exponencial, lineal y estacionaria. La fase lenta corresponde al establecimiento de las plantas (1 a 16 ddt); la fase exponencial es cuando la tasa de crecimiento incrementa y corresponde al desarrollo y crecimiento vegetativo (46 a 76 ddt). En la fase lineal la tasa de crecimiento es constante y corresponde al valor máximo de esta variable durante el ciclo de vida del cultivo; es cuando inicia la floración y el crecimiento de frutos (76 a 106 ddt). La fase estacionaria se caracteriza por el cese del crecimiento, y ocurre cuando los frutos han iniciado el proceso de madurez (106 a 136 ddt).

Las plantas que crecieron en el ambiente de cultivo A40 tuvieron de 20 a 49 % mayor cantidad de hojas ( $\alpha \leq 0.05$ ), y en consecuencia mayor área foliar que en A33 y A42, principalmente al final del cultivo (136 ddt).

Cuadro 11. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la primera fecha de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Altura			Alt. de bif. del tallo			Número de hojas		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	14.4 a	39.1 b	53.6 b	0	24.1 a	20.6 b	18.3 a	99.5 b	281.0 ab
A40	16.3 a	62.0 a	75.7 a	0	21.3 a	27.9 a	17.8 a	107.5ab	412.3 a
A42	13.7 a	54.1 a	70.1 a	0	25.9 a	22.8 b	19.8 a	136.5 a	233.8 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. Altura: altura de planta (cm); Altura de bifurcación del tallo (cm), Número de hojas: número de hojas por planta.

Cuadro 12. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la segunda fecha de cultivo (f2, 02/06/2017 al 16/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Altura			Alt. de bif. del tallo			Número de hojas		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	15.6 b	45.0 c	50.9 c	0	26.1 a	22.0 b	17.3 a	158.3 a	324.5 b
A40	20.3 a	71.2 a	93.0 a	0	29.6 a	31.8 a	17.3 a	162.0 a	419.3 a
A42	13.1 b	64.8 b	71.4 b	0	31.5 a	22.6 b	19.0 a	136.3 a	240.5 c

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. Altura: altura de planta (cm); Altura de bifurcación del tallo (cm), Número de hojas: número de hojas por planta.

Cuadro 13. Medias de variables morfológicas de crecimiento, Altura, Altura de bifurcación del tallo y Número de hojas en relación al ambiente de crecimiento en la tercera fecha de cultivo (f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Ambiente	Altura			Alt. de bif. del tallo			Número de hojas		
	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt	16 ddt	76 ddt	136 ddt
A33	14.0 b	42.6 b	50.6 c	0	25.7 a	22.6 b	16.0 ab	129.8 a	207.3 c
A40	17.4 a	64.4 a	91.8 a	0	26.9 a	29.9 a	16.3 a	165.3 a	409.5 a
A42	12.3 b	64.7 a	79.1 b	0	27.5 a	27.4 a	13.0 b	161.3 a	308.3 b

Medias con letras iguales por columna son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. Altura: altura de planta (cm); Altura de bifurcación del tallo (cm), Número de hojas: número de hojas por planta.

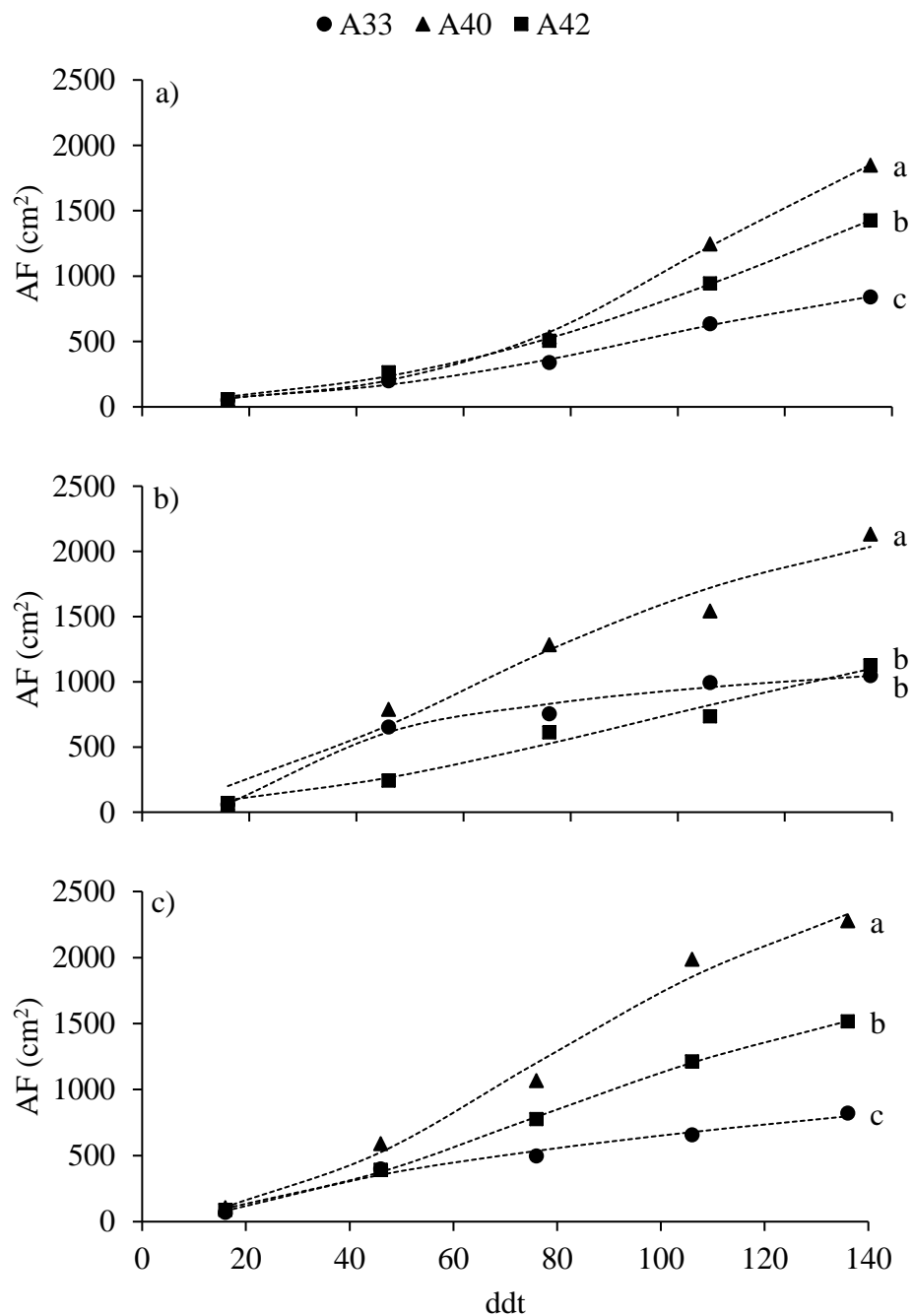


Figura 8. Medias de Área Foliar (AF, cm<sup>2</sup>) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (-●-), A40 (-▲-) y A42 (-■-), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. Medias con letras iguales son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha = 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes.

Modelos de ajuste para cinética de Área Foliar: f1, A33:  $y = 1058.2/(1 + 24.6 * \exp(-0.03 * x))$  (R = 0.99, SE = 30.7), A40:  $y = 2354/(1 + 69 * \exp(-0.04 * x))$  (R = 0.99, SE = 44.16), A42:  $y = (4282.5 * \exp(-\exp(1.5 - 0.01x)))$  (R = 0.99, SE = 29.15); f2, A33:  $y = (-3306.1 * 2 + 1866.9x^{0.48})/(2 + x^{0.48})$  (R = 0.99, SE = 94.1), A40:  $y = (2439.7 * \exp(-\exp(1.26 - 0.02x)))$  (R = 0.98, SE = 196.15), A42:  $y = (1889.4 * \exp(-\exp(1.3 - 0.01x)))$  (R = 0.98, SE = 91.1); f3, A33:  $y = (-347.8 * 94.7 + 10449.4x^{0.49})/(94.7 + x^{0.49})$  (R = 0.99, SE = 67.8), A40:  $y = (2997.4 * \exp(-\exp(1.5 - 0.02x)))$  (R = 0.99, SE = 145.5), A42:  $y = (2043 * \exp(-\exp(1.4 - 0.02x)))$  (R = 0.99, SE = 19.68), donde “y” es AF y “x” es ddt.

#### 4.7. Índices de eficiencia fisiológica

Los índices propuestos para el análisis de crecimiento son herramientas que se emplearon en el análisis matemático de crecimiento de esta investigación, se usaron medidas directas como biomasa seca y área foliar, lo que permitió conocer la ganancia de biomasa por unidad de biomasa y de tiempo (TRC), el incremento de biomasa de la planta por unidad de tiempo (TAC), el incremento en el peso de la planta por unidad de área foliar y por unidad de tiempo (TAN) y el área foliar del cultivo en función de la superficie de cobertura (IAF).

Estos índices permiten analizar el crecimiento de la planta a través de la acumulación de biomasa seca, la cual depende del tamaño del área foliar, de la tasa a la cual funcionan las hojas y el tiempo que el follaje persiste (Tekalign y Hammes, 2005a).

##### 4.7.1. Tasa de crecimiento relativo

La TRC es considerada como la actividad de la demanda fisiológica o velocidad con la que se acumula carbono en la planta, mide el aumento en la biomasa seca con una cantidad dada de material asimilatorio en un punto dado de tiempo (Ho *et al.*, 1989; Rajput *et al.*, 2017), es uno de los índices de eficiencia más importantes, que conjunta varias características fisiológicas y morfológicas de las plantas (Ozaki *et al.*, 2018).



El comportamiento de la TRC fue igual entre ambientes (Figura 9); inició con valores altos y disminuyó conforme avanzó el ciclo. En el periodo de 0 a 16 ddt se observó la máxima TRC en la f2 bajo A40 con un valor de  $0.042 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ . Conforme avanzó el ciclo del cultivo la TRC disminuyó hasta  $0.03 \text{ g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en el periodo de 76 a 106 ddt. las plantas cultivadas en la f2 fueron más eficientes en la acumulación de biomasa seca en función del tiempo. En contraste, las menos eficientes fueron las cultivadas en f1. Este comportamiento es esperado ya que la  $T_{\text{media}}$  del aire en la f2 fue similar a la reportada como óptima para el cultivo de chile. Gent (2017) y Hatfield y Prueger (2015) reportaron que la TRC y el desarrollo de la planta están altamente correlacionados con la temperatura del aire que la rodea. La TRC como un indicador de la actividad meristemática de la planta u órgano, corresponde a la capacidad de división y crecimiento celular; por ello la TRC decrece conforme la planta crece y con ello aumenta la cantidad de tejidos maduros (González *et al.*, 1986), esta disminución de TRC se debe a la baja del potencial fotosintético que ocurre con la edad biológica de la planta (Castellanos *et al.*, 2009; Ayala-Garay *et al.*, 2011).

#### **4.7.2. Tasa absoluta de crecimiento**

La TAC como un indicador de la fuerza de la demanda (Ho *et al.*, 1989) mostró un comportamiento similar en los ambientes de cultivo (Figura 10) en donde el valor máximo alcanzado fue a los 76 ddt,  $0.86 \text{ g d}^{-1}$  en A40 durante f2, posteriormente disminuyó hasta el final del experimento (136 ddt).

#### **4.7.3. Tasa de asimilación neta**

La TAN como indicador de la eficiencia fotosintética promedio, representa el aumento en biomasa seca de planta por unidad de área foliar por unidad de tiempo; mostró en casi todos los casos el mayor incremento en el intervalo de 46 a 76 ddt (Figura 11), cuando las plantas presentaron el mayor crecimiento debido a que se encontraban en el inicio de la etapa fenológica de desarrollo de hojas. Sin embargo, en la f1 fue diferente porque a los 106 ddt las plantas en los ambientes A40 y A42 alcanzaron el máximo valor de TAN; en cambio, la TAN, en las f2 y f3 disminuyó de manera progresiva después de los 76 ddt y en el periodo de 46 a 76 ddt las plantas en el A40 presentaron la mayor TAN.

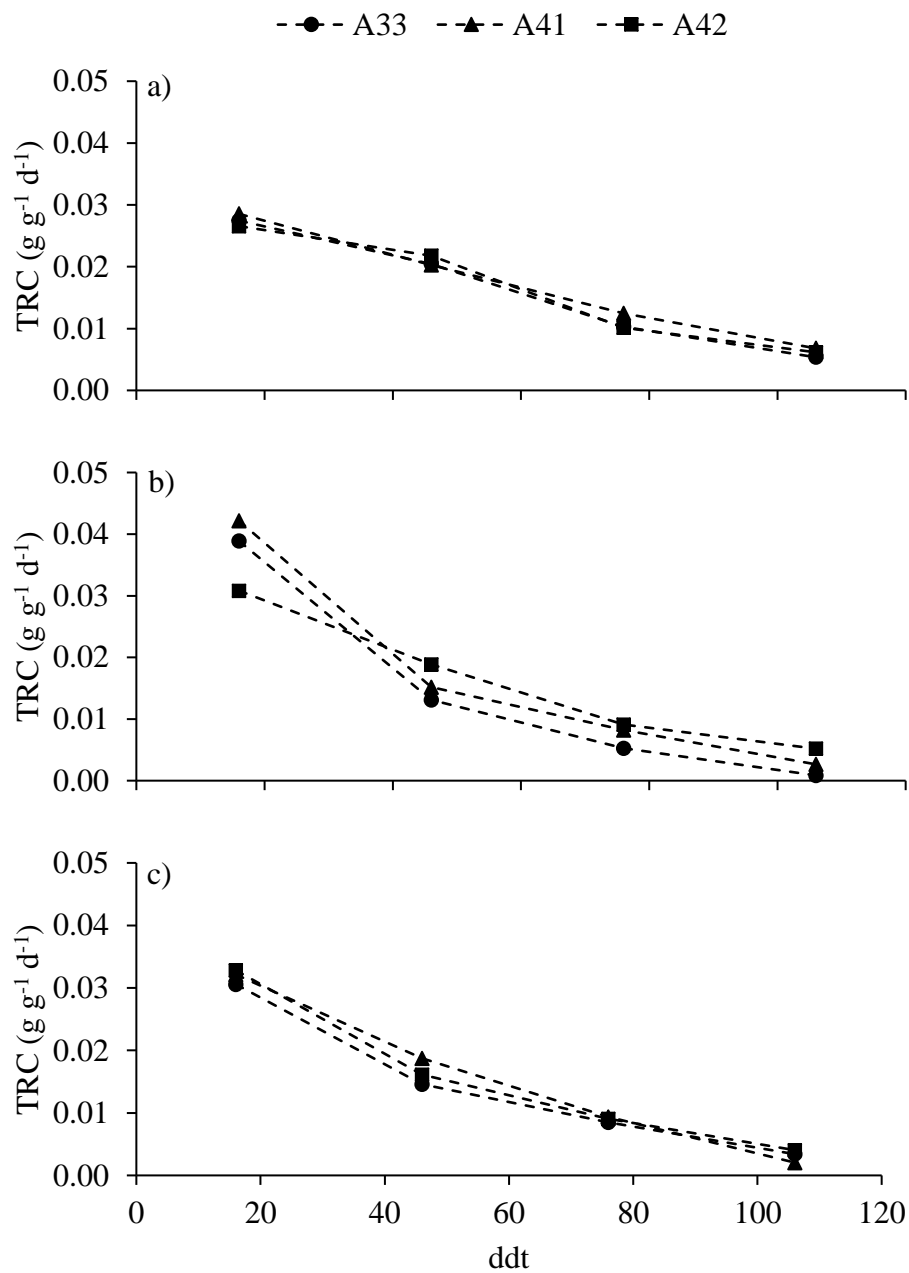


Figura 9. Tasa Relativa de Crecimiento (TRC,  $\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--), A42 (--■--), y A44 (--×--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

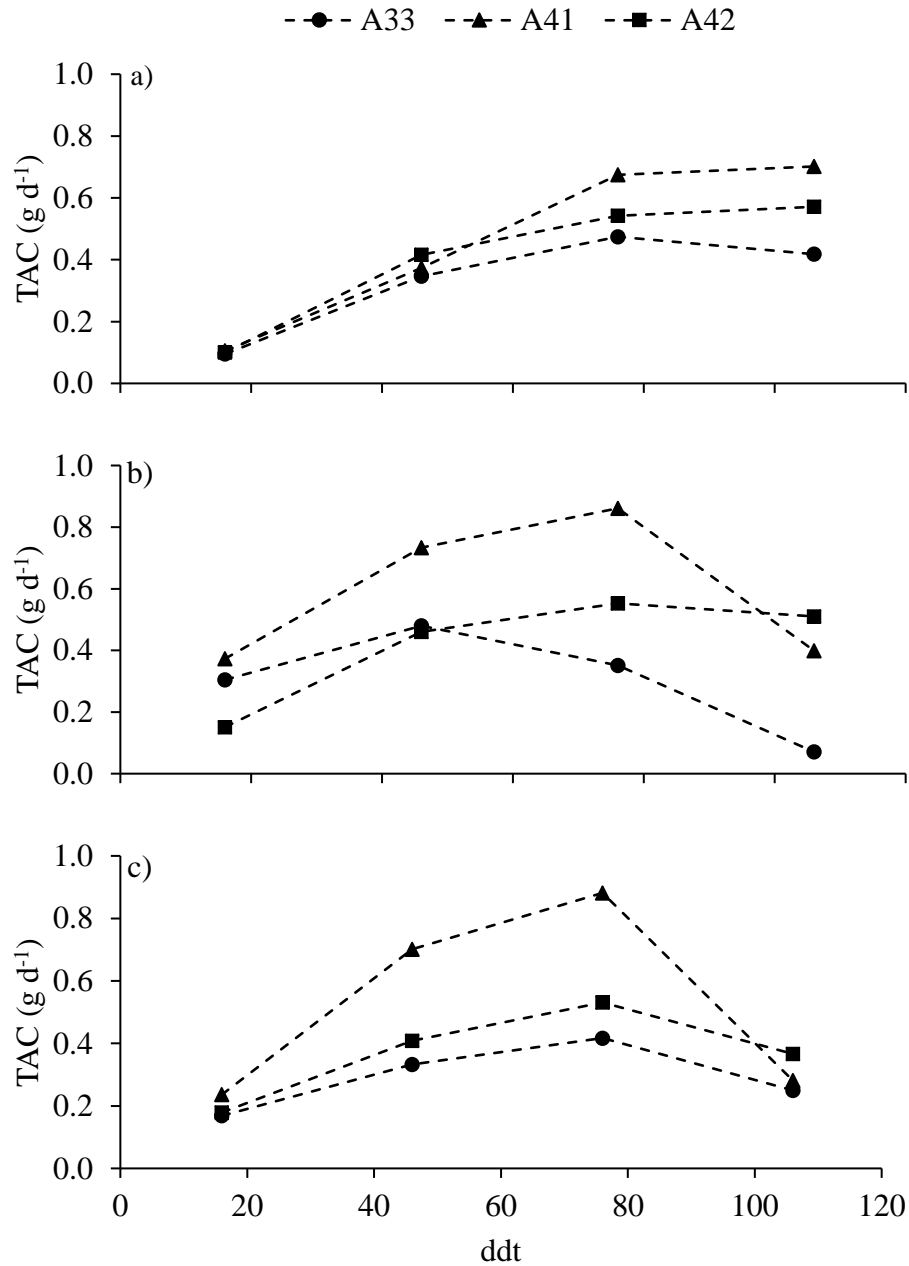


Figura 10. Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC, g d<sup>-1</sup>) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (●), A40 (▲), A42 (■) y A44 (×), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

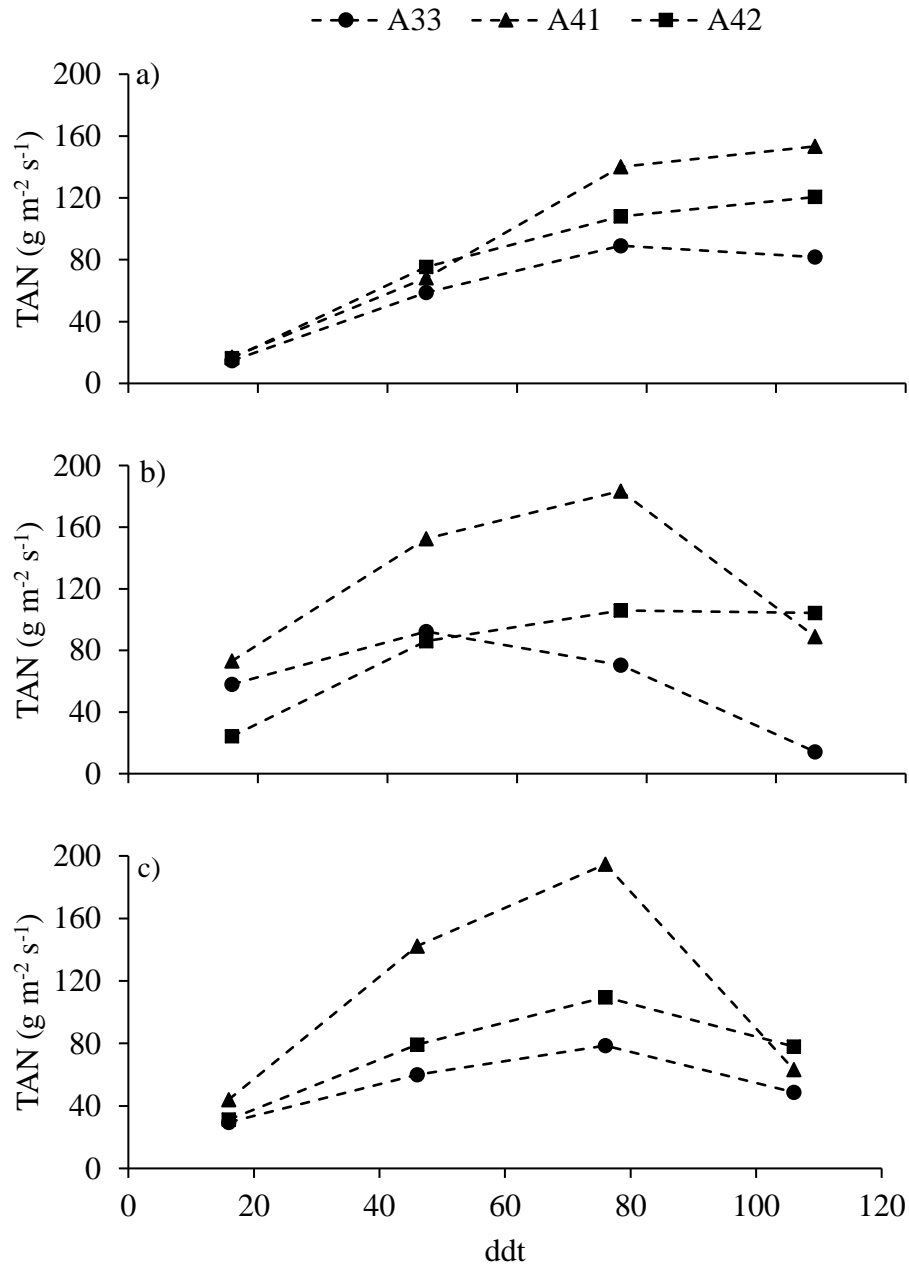


Figura 11. Tasa de Asimilación Neta (TAN,  $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (---●---), A40 (---▲---), A42 (---■---) y A44 (---×---), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

#### 4.7.4. Índice de área foliar

Las medias de IAF fueron diferentes estadísticamente ( $\alpha \leq 0.05$ ) (Cuadro 14), los valores más altos se observaron los 136 ddt en A40 en las tres fechas de siembra, el mayor incremento fue en f2 con  $1.14 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . En cambio, la menor media de IAF se observó en A33 con  $0.41 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  en f3.

La producción biomasa seca está relacionada con el área foliar, por lo tanto, cuando es alta se espera una mayor acumulación de biomasa seca (Santos *et al.*, 2010). El aumento en el tamaño del área foliar en *Capsicum* se ha relacionado con el resultado de temperaturas altas provocadas por la intensidad de luz durante el ciclo del cultivo, tal como se observa en investigaciones previas (Nilwik, 1981; De Swart *et al.*, 2010) y que coincide con este experimento.

El IAF varía con la forma de la hoja y la distribución tanto vertical como horizontal del follaje, el IAF óptimo es aquel que soporta la máxima tasa de producción de biomasa seca, y se consigue cuando el cultivo intercepta virtualmente toda la RFA disponible (Clavijo, 1989), y en consecuencia las capas más bajas de hojas aún son capaces de mantener un balance positivo de carbono (Hunt, 1978).

IAF es uno de los predictores más importantes del crecimiento y rendimiento de las plantas, ya que tiene efectos directos en diferentes procesos ecofisiológicos de varios cultivos (Sadras y Lemaire, 2014).

Cuadro 14. Media del índice de área foliar (IAF,  $m^2 m^{-2}$ ) por ambiente de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Fecha de siembra	Ambiente de cultivo	IAF
f1	A33	0.42 c
	A40	0.92 a
	A42	0.71 b
f2	A33	0.52 bc
	A40	1.07 a
	A42	0.56 b
f3	A33	0.41 c
	A40	1.14 a
	A42	0.76 b

Medias con letras iguales por columna y por fecha son estadísticamente similares. Prueba “t” de student ( $\alpha \leq 0.05$ ) bajo una comparación de medias por pares entre ambientes. IAF: Índice de Área Foliar ( $m^2 m^{-2}$ ).

#### 4.8. Parámetros fisiológicos

##### 4.8.1. Eficiencia en el uso de la radiación en la banda fotosintética

La interceptación de la radiación solar por las plantas y la utilización de energía radiante para la producción de biomasa vegetal es esencial para los procesos fundamentales que rigen el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Purcell *et al.*, 2002). La cantidad de biomasa producida ( $g m^{-2}$ ) por unidad de radiación solar interceptada ( $MJ m^{-2}$ ) define la EUR del cultivo ( $g MJ^{-1}$ ), en condiciones óptimas de crecimiento de la planta, la acumulación de biomasa del cultivo depende de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el dosel (Monteith, 1977).

En este estudio, el valor mayor de EUR se observó en A40 en la f2 con  $0.18 g MJ^{-1}$  (Cuadro 15), en donde la prueba de medias indicó que los valores fueron diferentes en f2 y f3. El valor promedio de EUR obtenido en el experimento fue  $0.13 (\pm 0.02) g MJ^{-1}$ ; Kara y Yildirim (2015) reportan en

pimiento (*Capsicum annuum* L.) un valor de EUR de 0.43 ( ± 0.2) g MJ<sup>-1</sup>; Yildirim *et al.* (2017), Karam *et al.* (2009), Vieira *et al.* (2009) se han encargado de evaluar los cambios de EUR en pimiento bajo diferentes condiciones de cultivo.

La cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por un cultivo depende también del área de la hoja y su porcentaje de cobertura del suelo (Monteith, 1977), los valores de EUR encontrados en la literatura corresponden a pimiento, que son plantas de mayor porte, es decir, con mayor cantidad de área foliar, en comparación con las de chile guajillo, lo cual justifica los valores más altos reportados.

Cuadro 15. Eficiencia en el uso de la radiación (EUR) de plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Fecha de siembra	Ambiente	EUR (g MJ <sup>-1</sup> )	S	C. V. (%)
f1	A33	0.10 a	0.014	14
	A40	0.13 a	0.025	19
	A42	0.13 a	0.006	5
f2	A33	0.10 c	0.005	5
	A40	0.18 a	0.012	7
	A42	0.13 b	0.004	3
f3	A33	0.10 c	0.004	4
	A40	0.17 a	0.017	10
	A42	0.12 b	0.002	2

Medias con letras iguales por columna y por fecha son estadísticamente similares. Prueba “t” de student (α = 0.05). EUR: Eficiencia en el uso de la radiación; S: desviación estándar; C.V.: coeficiente de variación (%).

#### 4.8.2. Área foliar específica

El AFE fue alto al inicio del experimento (1 a 16 ddt) y disminuyó progresivamente durante el tiempo que duró el ciclo del cultivo, el comportamiento fue igual ( $\alpha \leq 0.05$ ) entre los ambientes (Figura 12).

El área foliar y el área foliar específica son indicadores importantes de la respuesta biológica a los cambios en las condiciones de crecimiento del cultivo, incluida la disponibilidad de luz y agua (Williams y Nelson, 2018).

El AFE vincula los ciclos de carbono y agua de la planta, y proporciona información sobre la variación espacial en la capacidad fotosintética y el contenido de nitrógeno en la hoja (Ali *et al.*, 2016). Milla y Reich (2007), indica que el AFE, refleja el área disponible para la intercepción de irradiancia solar por unidad de inversión asimilada, también, influye profundamente en la eficiencia de la asimilación de la radiación fotosintética activa y, en última instancia, la capacidad fotosintética de la planta (Green *et al.*, 2003).



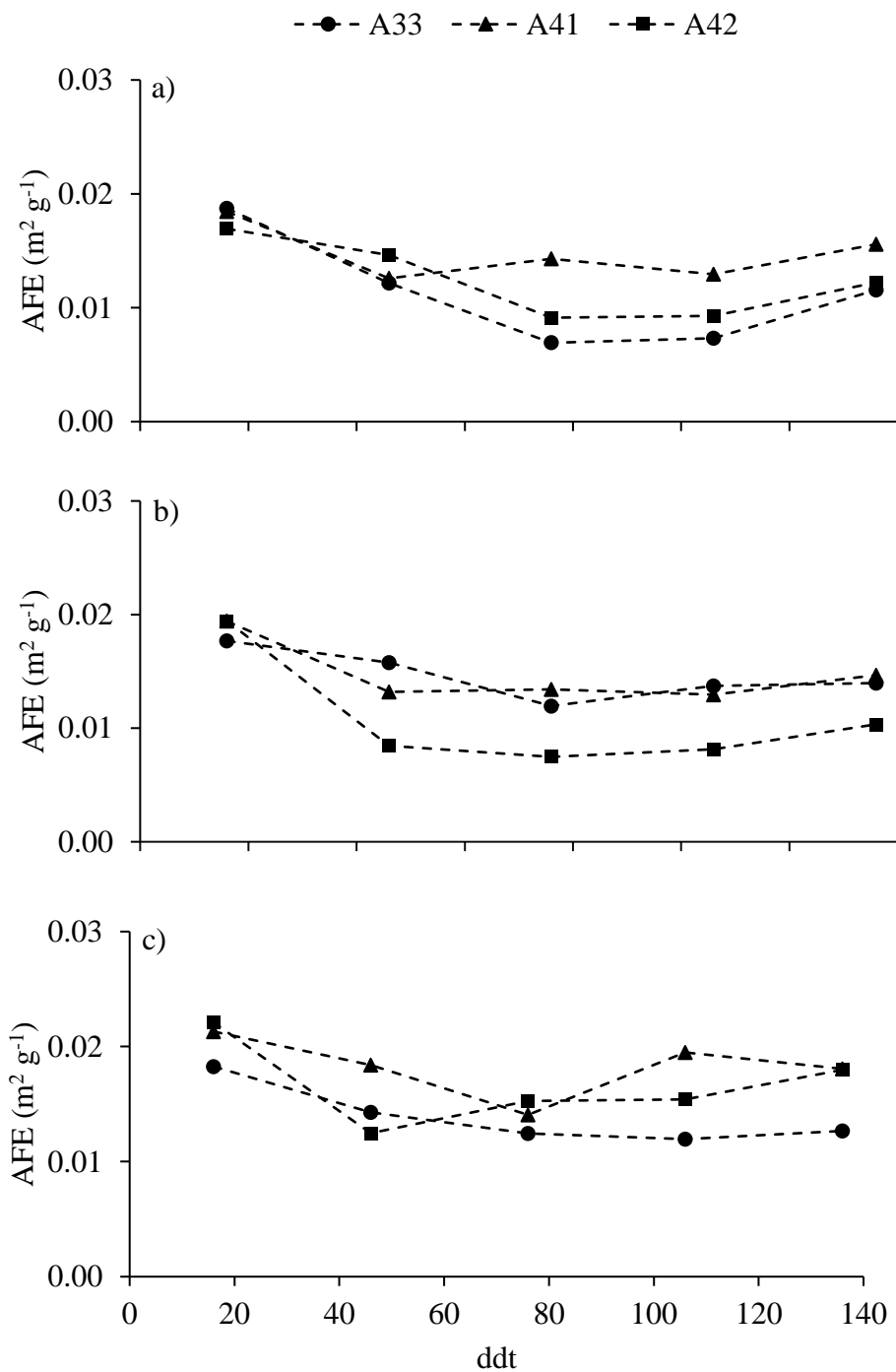


Figura 12. Área Foliar Específica (AFE) en relación a los ambientes de crecimiento A33 (--●--), A40 (--▲--) y A42 (--■--), en las tres fechas de cultivo establecidas a) f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, b) f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y c) f3, 10/06/2017 al 24/10/2017 de chile guajillo (*Capsicum annum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

#### 4.9. Correlación de variables

Diversos factores ambientales pueden afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas, como la luz, el agua y la temperatura del aire, las variaciones significativas de la temperatura del aire pueden limitar el crecimiento de la planta tanto en temperaturas bajas como altas (Lefsrud *et al.*, 2005).

En el Cuadro 16 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos, se observa que la BSH se relacionó con la  $T_{mín}$ ,  $T_{media}$ , y  $T_{media}$  nocturna con coeficientes de correlación mayores a 0.80; en particular las bajas temperaturas influyen en el crecimiento de la planta porque afectan la fotosíntesis, la absorción de agua y nutrientes, entre otros (Airaki *et al.*, 2012).

La  $T_{media}$  y  $T_{máx}$  se correlacionaron ( $R$  mayores a 0.80) con la altura de la planta. En general, la alta temperatura influye en muchos aspectos de la fisiología y el crecimiento de las plantas, lo que puede ocasionar pérdidas significativas en la productividad de los cultivos en muchas especies debido a un crecimiento vegetativo, reproductivo y producción de semillas limitados (Cross *et al.*, 2003).

BSR, se correlacionó ( $R$  mayores a 0.70) con todas las variables derivadas de la temperatura del aire y en particular con  $T_{media}$ ,  $T_{máx}$ , Oscilación térmica,  $T_{media}$  diurna y DIF con  $R$  mayores a 0.80.

La BSF no se correlacionó con ninguna de las variables derivadas de la temperatura. Sin embargo, otros autores han encontrado que  $T_{máx}$  se correlaciona con algunas variables de los frutos como son el peso del fruto, el diámetro del fruto, la longitud del fruto y el número de semillas por fruto, variables que disminuyen marcadamente a altas temperaturas (Thuy y Kenji, 2016).

El estrés térmico afecta negativamente la productividad de muchas especies de plantas, incluida la pimienta verde. El estrés por calor afecta el crecimiento de las plantas, aunque el nivel de umbral de calor difiere significativamente en las diferentes etapas de desarrollo (Wahid *et al.*, 2007).

Tampoco se observaron correlaciones entre las variables derivadas de la temperatura con el AFE, número de hojas ni con BST.

Cuadro 16. Correlaciones de Pearson entre variables derivadas de la temperatura del aire, parámetros y variables medidas en plantas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) cultivadas en tres ciclos de cultivo (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017; f2, 02/06/2017 al 16/10/2017; f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

	Tmín	Tmedia	Tmáx	OT	Tdiurna	Tnocturna	DIF
Altura de planta	0.64	0.81	0.8	0.79	0.79	0.65	0.79
Alt. Bif. del tallo	0.46	0.58	0.56	0.56	0.55	0.52	0.54
No. de hojas	0.44	0.31	0.26	0.25	0.28	0.5	0.23
AF	0.62	0.68	0.65	0.64	0.65	0.65	0.63
BSP	0.73	0.71	0.66	0.65	0.68	0.75	0.64
BSH	0.84	0.80	0.74	0.73	0.77	0.85	0.73
BST	0.58	0.46	0.39	0.38	0.42	0.63	0.37
BSR	0.74	0.85	0.82	0.82	0.83	0.73	0.82
BSF	-0.02	-0.11	-0.13	-0.14	-0.13	0.05	-0.15
IAF	0.56	0.48	0.43	0.41	0.45	0.6	0.41
EUR	0.63	0.69	0.65	0.64	0.66	0.65	0.64
AFE	0.22	0.07	0.03	0.02	0.05	0.26	0.02

Tmín: temperatura media del aire (°C), Tmedia: temperatura media del aire (°C), Tmáx: temperatura máxima del aire (°C), Osc. Térmica: oscilación térmica entre la temperatura máxima y la mínima (°C), Tmedia diurna: temperatura media del aire diurna (°C), Tmedia nocturna: temperatura media del aire nocturna (°C), DIF: diferencia entre la temperatura media diurna y la temperatura media nocturna del aire (°C), Altura de planta (cm), Alt. Bif. del tallo: altura de bifurcación del tallo (cm), No. De hojas: número de hojas, AF: área foliar, BSP: biomasa seca de planta, BSH: biomasa seca de hoja, BST: biomasa seca de tallo, BSR: biomasa seca de raíz, BSF: biomasa seca de frutos, IAF: índice de área foliar. EUR: eficiencia en el uso de la radiación, AFE: área foliar específica

En la Figura 13 y Figura 14 se observa que la BSH se correlacionó (R mayores a 0.80) con la Tmín y la Tnocturna. La Tmín es una variable que se ha relacionado con la disminución de la biomasa seca acumulada y la repartición de asimilados para la formación de órganos vegetativos en algunos

cultivos como el tomate (Adams *et al.*, 2001). En esta investigación se observó que cuando la  $T_{mín}$  y la  $T_{nocturna}$  disminuye, la BSH también, lo cual indica que mientras la temperatura del aire reduce por debajo de  $T_b$  la acumulación de BSH se ve afectada, esta relación se ajustó a modelos exponenciales con  $R^2 = 0.76$  para ambas variables.

La exposición de las plantas a bajas temperaturas del aire puede dañar el aparato fotosintético, inhibir la síntesis y degradación de proteínas, dañar la membrana del tilacoide y reducir la capacidad de transferencia de electrones de la planta (Guy *et al.*, 1985; Taiz y Zeiger 2006)

Además, también se ha informado que las bajas temperaturas nocturnas causan impactos negativos en los procesos de desarrollo reproductivo que conducen a una reducción en el rendimiento comercial del cultivo de chile (Gajanayake *et al.*, 2011; Javanmardi *et al.*, 2013).

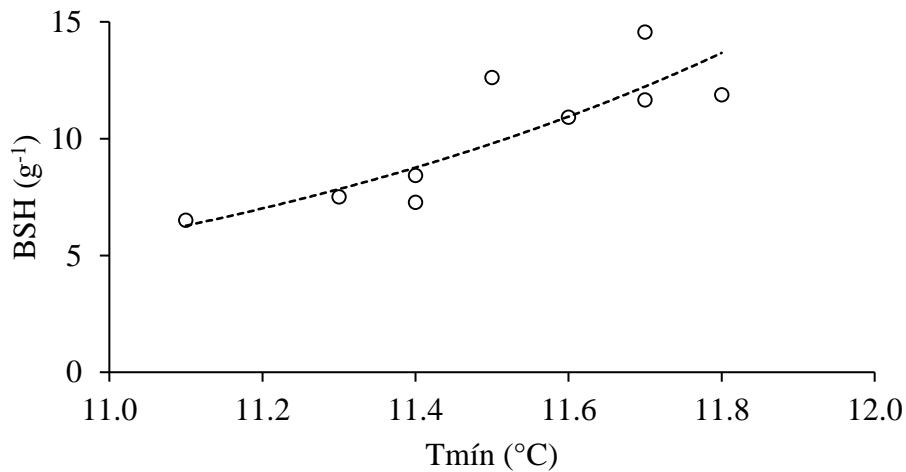


Figura 13. Medias de Biomasa Seca de Hojas (BSH,  $g^{-1}$ ) a los 136 ddt en correlación ( $R = 0.84$ ) con la Temperatura mínima ( $T_{mín}$ ,  $^{\circ}C$ ) ajustado a un modelo exponencial ( $y = 3E - 05e^{1.11x}$ ,  $R^2 = 0.76$ ) en las tres fechas de cultivo establecidas (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

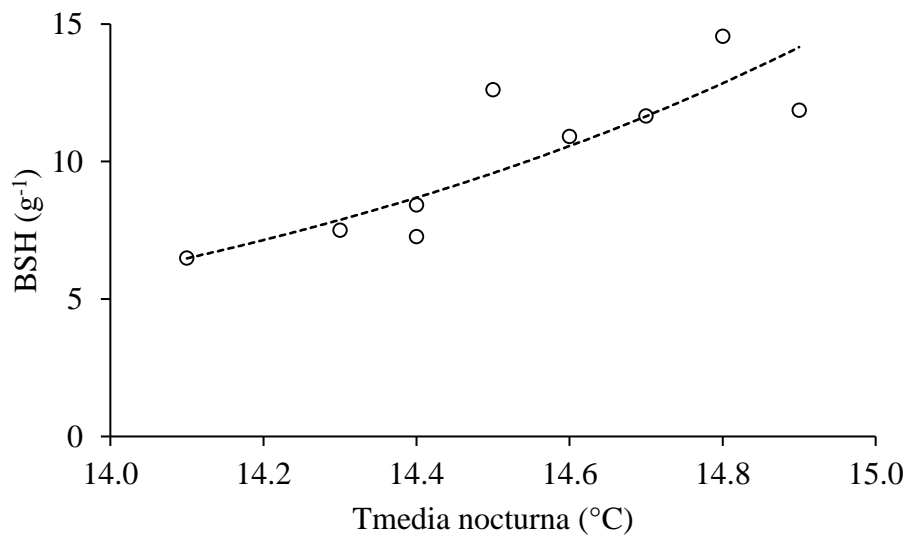


Figura 14. Medias de Biomasa Seca de Hojas (BSH, g<sup>-1</sup>) a los 136 ddt en correlación (R = 0.85) con la Temperatura media nocturna (Tmedia nocturna, °C) ajustado a un modelo exponencial ( $y = 7E - 06e^{0.98x}$ ,  $R^2 = 0.76$ ) en las tres fechas de cultivo establecidas (f1, 26/05/2017 al 09/10/2017, f2, 02/06/2017 al 16/10/2017 y f3, 10/06/2017 al 24/10/2017) de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México.

## 5. CONCLUSIONES

La temperatura del aire afectó el crecimiento y desarrollo del cultivo de chile guajillo (CP-1112). Conforme aumentó la temperatura se observaron alteraciones en las etapas fenológicas, a una temperatura máxima de crecimiento de 42 °C las plantas fueron las primeras en alcanzar la floración y a 33 °C se retrasaron los eventos fenológicos en comparación con temperaturas máximas 40 y 42 °C.

A nivel morfológico, un incremento de temperatura máxima del aire en 7 °C, con respecto al ambiente testigo, provocó un aumento en la altura de planta, número de hojas y por lo tanto en el área foliar, mientras que, el incremento en 9 °C disminuyó los valores medidos en las variables morfológicas.

La temperatura del aire también afectó en la producción de biomasa seca por planta, la mayor acumulación se presentó consistentemente a 40 °C en los tres experimentos, de 11 a 29 % mayor que en las plantas cultivadas a 42 °C, y de 27 a 48 % mayor que las plantas cultivadas a 33°C. La temperatura promedio mínima y nocturna se correlacionaron con la acumulación de biomasa en hojas, mientras que la acumulación en raíces se vio afectada por las variables derivadas de la temperatura, en donde se observó que al incrementar la temperatura de cultivo la biomasa seca disminuyó para este órgano.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Adams S. R., K. E. Cockshull., y C. R. J. Cave. 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany* 88: 869-877.
- Aguilar-Rincón V. H., T. Corona T., P. López L., L. Latournerie M., M. Ramírez M., H. Villalón M., y J. A. Aguilar Castillo. 2010. Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Airaki M., M. Leterrier., R. M. Mateos., R. Valderrama., M. Chaki., J. B. Barroso., L. A. Del Río., J. M. Palma., y F. J. Corpas. 2012. Metabolism of reactive oxygen species and reactive nitrogen species in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under low temperature stress. *Plant, Cell & Environment* 35: 281-295.
- Ali A. M., R. Darvishzadeh., A. K. Skidmore., y I. Van Duren. 2016. Effects of canopy structural variables on retrieval of leaf dry matter content and specific leaf area from remotely sensed data. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing* 9: 898-909.
- Ayala V, M. J. 2012. Análisis del crecimiento y calidad de semillas de tres tipos de chile (*Capsicum annuum* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados – Fisiología Vegetal. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 39 p.
- Ayala-Garay O. J., J. A. Carrillo-Salazar., E. Hernández-García., E. Díaz-Martínez., M. Livera-Muñoz., y G. Almaguer-Vargas. 2011. Crecimiento de plántulas de estátice (*Limonium sinuatum*) y viola (*Viola cornuta*) en ambientes contrastantes. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 17: 129-140.
- Azcón-Bieto J., y M. Talón. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2a. ed. McGraw - Hill Interamericana. España. 369 p.
- Azofeifa A., y M. A. Moreira. 2008. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. Hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía costarricense: Revista de ciencias agrícolas* 32: 19-29.
- Baudoin W., R. Nono-Womdim, *et al.* 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas. FAO plant production and protection paper.

- Black C., y C. Ong. 2000. Utilisation of light and water in tropical agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 104: 25-47.
- Bonhomme R. 2000. Beware of comparing RUE values calculated from PAR vs solar radiation or absorbed vs intercepted radiation. *Field Crops Research* 68: 247-252.
- Bosland P. W. 1994. Chiles: History, cultivation, and uses. G. Charalambous (Ed.), *Spices, Herbs and Edible Fungi*, Elsevier Science, New York. 347-366.
- Bosland P. W., y E. J. Votava. 2012. *Peppers: Vegetable and spice *campsicums**. 2a ed. Cabi. London UK. 230 p.
- Bravo L, A. G., G. Galindo G., y M. D. Amador R. 2006. Tecnología de producción de chile seco. INIFAP, CIRNOC, Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico: 5.
- Byers D. S. 1967. The prehistory of the tehuacán valley: Environment and subsistence. University of Texas Press, published for the Robert S. Peabody Foundation, Phillips Academy, Andover. Texas, United States of America.
- Casierra-Posada F., D. I. Hernandez., P. Lüders., y G. Ebert. 2003. Crecimiento de frutos y ramas de manzano “Anna” (*Malus domestica Borkh*) cultivado en los altiplanos colombianos. *Agronomía Colombiana* 21: 69-73.
- Casierra-Posada F., M. C. Cardozo., y J. F. Cárdenas-Hernández. 2007. Análisis del crecimiento en frutos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero. *Agronomía colombiana* 25: 299-305.
- Castellanos C., J. A. Barrera., M. S. Hernández., L. M. Melgarejo., M. Carrillo., L. Rodríguez., y O. Martínez. 2009. Efecto de la densidad de plantación sobre crecimiento, producción y calidad en cinco accesiones de aji (*Capsicum* spp.) cultivadas en la amazonia occidental colombiana. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 3: 95-109.
- Chaki M., P. Álvarez de Morales., C. Ruiz., J. C. Bergara-Morales., J. B. Barroso., F. J. Corpas., y J. M. Palma. 2015. Ripening of pepper (*Capsicum annuum*) fruit is characterized by an enhancement of protein tyrosine nitration. *Annals of Botany* 116: 637-647.
- Chang M. C., Y. Yao., G. Li., Y. Tong., y P. Tu. 2017. Cloud tracking for solar irradiance prediction. *Image Processing (ICIP). IEEE International Conference on*. 4387-4391 p.
- Chavarria G., A. Caverzan., M. Müller., M. Rakocevic. 2017. Soybean architecture plants: From solar radiation interception to crop protection. *Soybean-the basis of yield, biomass and productivity. InTech*. 2: 15-33.



- Cross R. H., S. A. B. McKay., A. G. McHughen., y P. C. Bonham-Smith. 2003. Heat-stress effects on reproduction and seed set in *Linum usitatissimum* L.(flax). *Plant, Cell & Environment* 26: 1013-1020.
- De Swart E. A. M., L. F. M. Marcelis., y R. E. Voorrips. 2006. Variation in relative growth rate and growth traits in wild and cultivated *Capsicum* accessions grown under different temperatures. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 81: 1029-1037.
- De Swart E. A. M., P. Stam., R. E. Voorrips., y L. F. M. Marcelis. 2010. Influence of temperature on plant morphology traits and their relationship to relative growth rate in wild and cultivated *Capsicum* accessions. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 85: 177-184.
- Díaz-López E., J. M. Loeza-Corte., J. M. Campos-Pastelín., E.J. Morales-Rosales., A. Dominguez-López., O. Franco-Mora. 2013. Eficiencia en el uso de la radiación, tasa de asimilación neta e integral térmica en función del fósforo en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 47: 135-146.
- Dogan A., C. Uyak., N. Keskin., A. Akcay., R. I. G. Sensoy., y S. Ercisli. 2018. Grapevine leaf area measurements by using pixel values. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences* 71: 772-779.
- Ellsworth D. S. y P. B. Reich. 1993. Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest. *Oecologia* 96: 169-178.
- Erickson A. N. y A. H. Markhart. 2002. Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. *Plant, Cell & Environment* 25: 123-130.
- Eshbaugh W. H. 1980. The taxonomy of the genus *Capsicum* (*Solanaceae*). *Phytologia* 47: 153-165.
- Evans G. C. 1972. *The quantitative analysis of plant growth*. Vol. 1. Univ of California Press.
- Falster D. S. y M. Westoby. 2003. Plant height and evolutionary games. *Trends in Ecology & Evolution* 18: 337-343.
- FAOSTAT. 2016. *Statistical databases*. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Rome Italy.
- Flórez V., A. Fernández., D. Miranda., B. Chaves., y J. Guzmán. 2006. *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Unibiblos, Bogotá, Colombia.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for mediterranean climate areas. Plant production and protection paper. Rome, Italy. 24 p.
- Gajanayake B., B. W. Trader., K. R. Reddy., y R. L. Harkess. 2011. Screening ornamental pepper cultivars for temperature tolerance using pollen and physiological parameters. HortScience 46: 878-884.
- Gardner F. P., R. B. Pearce., y R. L. Mitchell. 2003. Physiology of crop plants. Physiology of crop plants. 2a ed. Scientific publishers. Jodhpur, India. 327 p.
- Garruña-Hernández R., A. Canto., J. O. Mijangos-Cortés., I. Islas., L. Pinzón., y R. Orellana. 2012. Changes in flowering and fruiting of habanero pepper in response to higher temperature and CO<sub>2</sub>. J Food Agric Environ 10: 802-808.
- Gent M. P. 2017. Factors affecting relative growth rate of lettuce and spinach in hydroponics in a greenhouse. HortScience 52: 1742-1747.
- Giannopoulos A., P. Bresta., D. Nikolopoulos., G. Liakopoulos., C. Fasseas., y G. Karabourniotis. 2018. Changes in the properties of calcium-carbon inclusions during leaf development and their possible relationship with leaf functional maturation in three inclusion-bearing species. Protoplasma: 1-10.
- Godawatte V. N. A., C. S. De Silva., y M. D. M. Gunawardhana. 2011. Effect of mulch on growth and yield of chilli (*Capsicum annuum* L.) to cope with global temperature stress due to climate change. The open University of Sri Lanka. pp. 8 <http://digital.lib.ou.ac.lk/docs/handle/701300122/380>
- González H. V. A., M. Livera M., O.L.E., Mendoza., y C. C. Barrera. 1986. Crecimiento y desarrollo de sorgos contrastantes en vigor y precocidad. Fitotecnia 8: 95-110.
- Goudriaan J. y H. Van Laar. 2012. Modelling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Springer Science & Business Media.
- Green D. S., J. E. Erickson., y E. L. Kruger. 2003. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation. Agricultural and Forest Meteorology 115: 163-171.
- Grimstad S. O. y E. Frimanslund. 1993. Effect of different day and night temperature regimes on greenhouse cucumber young plant production, flower bud formation and early yield. Scientia horticultrae 53: 191-204.

- Guy C. L., K. J. Niemi., y R. Brambl. 1985. Altered gene expression during cold acclimation of spinach. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 82: 3673-3677.
- Haroun S. A., W. M. Shukry., M. A. Abbas., y A. M. Mowafy. 2011. Growth and physiological responses of *Solanum lycopersicum* to atonik and benzyl adenine under vernalized conditions. *Journal of Ecology and the Natural Environment* 3: 319-331.
- Hatfield J. L. y J. H. Prueger. 2011. Agroecology: Implications for plant response to climate change. *Crop adaptation to climate change*: 27-43.
- Hatfield J. L. y J. H. Prueger. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes* 10: 4-10.
- Heiser C. H. 1964. Los chiles y ajíes (*Capsicum*) de Costa Rica y Ecuador. *Ciencia y naturaleza* 7: 50-55.
- Hernández V, S. 2011. Los parientes silvestres del chile: Su importancia biológica y cultural. El Chile. Protagonista de la independencia y la revolución. K. Richterich (Coord. Edit.). Fundación Herdez. México, DF pp: 21-26.
- Ho L. C., R. I. Grange., y A. F. Shaw. 1989. Source/sink regulation. Transport of photoassimilates. Ed. by Baker, D.A. and Milburn, J.A. Longman Scientific and Technical, New York, p 306-343.
- Howard L. R., S. T. Talcott., C. H. Brenes., y B. Villalon. 2000. Changes in phytochemical and antioxidant activity of selected pepper cultivars (*Capsicum species*) as influenced by maturity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48: 1713-1720.
- Hunt R. 1990. Basic growth analysis. *Plant growth analysis for beginners*. Acad. Div. Unwin Hyman Ltd, London.
- Hunt R., 1978. *Plant growth analysis*. The institute of biology's studies in biology no. 96 Edward Arnold. The Camelot Press Ltd., Southampton, Great Britain.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.
- IPGRI., AVRDC y CATE. 1995. *Descriptors for Capsicum (Capsicum spp.)*. International plant genetic resources institute, Rome, Italy; the asian vegetable research and development center, Taipei, Taiwan, and the centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 51 p.

- Javanmardi J., M. Rahemi., y M. Nasirzadeh. 2013. Physiological and reproductive responses of tomato and pepper transplants to low-temperature conditioning. *International journal of vegetable science* 19: 294-310.
- Kara H. O. y M. Yildirim. 2015. Water and radiation use efficiencies of pepper (*Capsicum annuum* L. cv. Carliston). *Scholars J. Agric. Vet. Sci* 2: 87-93.
- Karam F., R. Masaad., R. Bachour., C. Rhayem., y Y. Rouphael. 2009. Water and radiation use efficiencies in drip-irrigated pepper (*Capsicum annuum* L.): Response to full and deficit irrigation regimes. *European Journal of Horticultural Science* 74: 79.
- Kim H. C., Y. Ku., Y. B. Lee., J. H. Lee., J. H. Choi., y J. H. Bae. 2013. Early growth of sweet pepper by difference between day and night temperature after planting. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 31: 552-557.
- Kjaersgaard J. H., F. L. Plauborg., y S. Hansen. 2007. Comparison of models for calculating daytime long-wave irradiance using long term data set. *Agricultural and forest Meteorology* 143: 49-63.
- Klie S., S. Osorio., T. Tohge., M. F. Drincovich., A. Fait., J. J. Giovannoni., A. R. Fernie., y Z. Nikoloski. 2014. Conserved changes in the dynamics of metabolic processes during fruit development and ripening across species. *Plant Physiology*, 164(1), 55-68.
- Kuo C. y C. T. Tsai. 1984. Alternation by high temperature of auxin and gibberellin concentrations in the floral buds, flowers, and young fruit of tomato. *HortScience*, 19: 870-872.
- Lefsrud M. G., D. A. Kopsell., D. E. Kopsell., J. Curran-Celentano. 2005. Air temperature affects biomass and carotenoid pigment accumulation in kale and spinach grown in a controlled environment. *HortScience* 40: 2026-2030.
- Lim K., J. Chung, et al. 1997. Influences of dif on growth and development of plug seedlings of *Lycopersicon esculentum* before and after transplanting. *Journal of Biological Production Facilities and Environment Control*. Korea Republic. [http://lib.rda.go.kr/newlib/adlib\\_en/index.html](http://lib.rda.go.kr/newlib/adlib_en/index.html)
- Long-Solís J. 1986. *Capsicum* y Cultura: La Historia del *Chilli* en México: Fondo Cultura Económica. México.
- López M, J. L., R. Andressen., y M Dennet. 2017. Intercepción de radiación solar por el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) en condiciones tropicales semiáridas. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 28: 43-46.

- Manrique L. A. 1990. Plant morphology of *Cassava* during summer and winter. *Agronomy journal* 82: 881-886.
- Manrique L. y 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.
- Mansour-Gueddes S. B., N. Tarchoun., J. A. Teixeira da Silva., y S. Saguem. 2010. Agronomic and chemical evaluation of seven hot pepper (*Capsicum annuum* L.) populations grown in an open field. *Fruit Veg. Cereal Sci. Biotechnol* 4: 93-97.
- Marcelis L. F. M. 1992. The dynamics of growth and dry matter distribution in *Cucumber* L. Effect of fruit load and temperature. *Sci. Hort* 54: 107-121.
- Markus F., H. G. Daood., J. Kapitány., y P. A. Biacs. 1999. Change in the carotenoid and antioxidant content of spice red pepper (*Paprika*) as a function of ripening and some technological factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47: 100-107.
- Márquez J. L. L., R. Andressen., y M. Dennet. 2017. Intercepción de radiación solar por el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) en condiciones tropicales semiáridas. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 28: 43-46.
- Martin C. A. y J. C. Stutz. 2004. Interactive effects of temperature and arbuscular mycorrhizal fungi on growth, P uptake and root respiration of *Capsicum annuum* L. *Mycorrhiza* 14: 241-244.
- Martín M, R. y E. Jerez M. 2017. Efecto de las temperaturas en el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) variedad romano. *Cultivos Tropicales* 38: 75-80.
- Melgarejo L. M., S. Hernández, et al. 2010. Experimentos en fisiología vegetal. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 277 p.
- Mercado J. A., M. S. Reid., V. Valpuesta., M. A. Quesada. 1997. Metabolic changes and susceptibility to chilling stress in *Capsicum annuum* plants grown at suboptimal temperature. *Functional Plant Biology* 24: 759-767.
- Milla R. y P. B. Reich. 2007. The scaling of leaf area and mass: The cost of light interception increases with leaf size. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 274: 2109-2115.

- Miller P., W. Lanier., y S. Brandt. 2001. Using growing degree days to predict plant stages. Ag/Extension Communications Coordinator, Communications Services, Montana State University-Bozeman, Bozeman, MO. 7/18.
- Milthorpe F. L. y J. Moorby. 1982. Introducción a la fisiología de los cultivos. Hemisferio Sur, Buenos Aires. 259 p.
- Mizrahi Y. 1982. Effect of salinity on tomato fruit ripening. *Plant Physiology* 69: 966-970.
- Monteith J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of applied Ecology* 9: 747-766.
- Monteith J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 281: 277-294.
- Nilwik H. J. M. 1981. Growth analysis of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.).1. The Influence of Irradiance and Temperature under Glasshouse Conditions in Winter. *Annals of Botany* 48: 137-146.
- Nuez V, F., J. Costa G., y R. Gil O. 2003. El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España.
- Okunlola G. O., O. A. Olatunji., R. O. Akinwale., A. Tariq., y A. A. Adelus. 2017. Physiological response of the three most cultivated pepper species (*Capsicum* spp.) in Africa to drought stress imposed at three stages of growth and development. *Scientia Horticulturae* 224: 198-205.
- Ozaki H., R. Oguchi., y K. Hikosaka. 2018. Dependence of functional traits related to growth rates and their CO<sub>2</sub> response on multiple habitat climate factors across *Arabidopsis thaliana* populations. *Journal of plant research*: 1-13.
- Palma J. M., F. J. Corpas., y L. A. del Río. 2011. Proteomics as an approach to the understanding of the molecular physiology of fruit development and ripening. *Journal of proteomics* 74: 1230-1243.
- Perin L., R. M. N. Peil., R. Trentin., E. A. Streck., D. S. B. da Rosa., D. Hohn., y W. Silveira S. 2018. Solar radiation threshold and growth of mini tomato plants in mild autumn/winter condition. *Scientia Horticulturae* 239: 156-162.
- Perry L., R. Dickau., S. Zarrillo., I. Holst., D. M. Pearsall., D. R. Piperno., M. J. Berman., R. G. Cooke., K. Rademaker., A. J. Ranere., J. S. Raymond., D. H. Sandweiss., F. Scaramelli.,

- K. Tarble., y J. A. Zeidler. 2007. Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum* spp. L.) in the americas. *Science* 315: 986-988.
- Pickersgill B. 1969. The archaeological record of chili peppers (*Capsicum* spp.) and the sequence of plant domestication in Peru. *American Antiquity* 34: 54-61.
- Pickersgill B. 1997. Genetic resources and breeding of *Capsicum* spp. *Euphytica* 96: 129-133.
- Prohens J. y A. Rodriguez-Burruezo. 2010. Advances in genetics and breeding of *Capsicum* and eggplant. Editorial de la Universitat Politècnica de Valencia. Valencia, España. 446 p.
- Purcell L. C., R. A. Ball, J. D. Reaper., y E. D. Vories. 2002. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. *Crop Science* 42: 172-177.
- Radford P. J. 1967. Growth analysis formulae - Their use and abuse. *Crop science* 7: 171-175.
- Rajput A., S. S. Rajput., y G. Jha. 2017. Physiological parameters leaf area index, crop growth rate, relative growth rate and net assimilation rate of different varieties of rice grown under different planting geometries and depths in sri. *Int. J. Pure App. Biosci* 5: 362-367.
- Ramiro C. A. 1992. VR-91 variedad de chile mirasol o guajillo para el norte centro de México. SARH. Folleto técnico núm. 2. San Luis Potosí, México.
- Ramiro C. A. 2001. Guajillo San Luis y guajillo Inifap, nuevas variedades de chile mirasol para el norte-centro de México. INIFAP. Folleto técnico núm. 14. San Luis Potosí, México.
- Reich P. B., M. B. Walters., y D. S. Ellsworth. 1997. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94: 13730-13734.
- Rodriguez P, R. A., J. Vanderlei C., A. Swarowsky., C. Urbanetto N., R. Rosales C., y H. M. C. de Morales Nogueira. 2015. Supplemental irrigation levels in bell pepper under shade mesh and in open-field: Absolute growth rate, dry mass, leaf area and chlorophyll. *African Journal of Agricultural Research* 10: 3968-3976.
- Rufino J. L. S. y D. C. S. Penteado. 2006. Importância econômica, perspectivas e potencialidades do mercado para pimenta. *Informe agropecuário* 27: 7-15.
- Sadras V. O. y G. Lemaire. 2014. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research* 164: 54-64.
- Santos C, M., M. Segura A., y C. E. Nústez L. 2010. Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín* 63: 5253-5266.

- Sedano-Castro G., V. A. González-Hernández., E. M. Engleman., C. Villanueva-Verduzco. 2005. Dinámica del crecimiento y eficiencia fisiológica de la planta de calabacita. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11(2): 291-297.
- SIACON. 2016. Sistema de información agroalimentaria de consulta. Consultado en la versión electrónica. México.
- Solomon S., D. Qin., M. Manning., K. Averyt., y M. Marquis. 2007. *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Song E. Y., K. H. Moon., I. C. Son., S. H. Wi., C. H. Kim., C. K. Lim., and S. Oh. 2015. Impact of elevating temperature based on climate change scenarios on growth and fruit quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17: 248-253.
- Steward F. C. 1969. *Plant physiology: Analysis of growth. A. Behavior of plants and their organs. B. The responses of cells and tissues in culture*. 2a ed. Academic Press. New York, USA.
- Sugiyanta S. y J. G. Kartika. 2018. Increasing production of chilli (*Capsicum annuum* L.) through foliar fertilizer application. *Journal of Tropical Crop Science* 5(1): 34-40.
- Taheri M. y M. Haghighi. 2018. Benzyl adenine is more effective than potassium silicate on decreasing the detrimental effects of heat stress in pepper (*Capsicum annuum* cv. PS301). *Iran Agricultural Research*, 37(1): 89-98.
- Taiz L. y E. Zeiger 2006. *Plant physiology*. 4th edn. Sunderland, MA, USA: Sinauer.
- Takahashi M., Y. Chie., y K. Toshikazu. 2018. Establishing an Efficient Fruit Ripening Method for Sweet Pepper (*Capsicum annuum* L.) through Light Irradiation and Dark Processing. *The Horticulture Journal*, 87(1): 73-79.
- Tarchoun N. y A. Mougou. 2009. Combining ability and heterosis for earliness flowering and fructification on pepper (*Capsicum annuum* L.) grown under low night temperature. *Int. J. Plant Breed* 3: 149-153.
- Tekalign T. and P. Hammes. 2005b. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth: II. Growth analysis, tuber yield and quality. *Scientia Horticulturae* 105: 29-44.



- Tekalign T. y P. Hammes. 2005a. Growth and productivity of potato as influenced by cultivar and reproductive growth: I. Stomatal conductance, rate of transpiration, net photosynthesis, and dry matter production and allocation. *Scientia Horticulturae* 105: 13-27.
- Thuy T. L. y M. Kenji. 2016. Effect of high temperature on fruit productivity and seed-set of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in the field condition. *Hue University Journal of Science*. 114: 515-521.
- Valbuena N., C. Parraga., L. Linares., J. Ramos y J. Junco. 2017. Modelos de estimación de área foliar a partir de observaciones morfológicas en *Brachiaria brizantha* cv. Toledo. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología* 34: 40-44.
- Vieira M. I., J. P. de Melo-Abreu., M. E. Ferreira., y A. A. Monteiro. 2009. Dry matter and area partitioning, radiation interception and radiation-use efficiency in open-field bell pepper. *Scientia Horticulturae* 121: 404-409.
- Vijay P., R. Pandey., y M. Pal. 2017. Plant growth analysis. Manual of ICAR Sponsored Training Programme for Technical Staff of ICAR Institutes on “Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants”. Division of Plant Physiology Institute (IARI), New Delhi, India. 122 p.
- Wahid A., S. Gelani., M. Ashraf., y M. R. Foolad. 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany* 61: 199-223.
- Wheeler T. R., P. Q. Craufurd., R. H. Ellis., J. R. Porter., y P. V. Vara P. 2000. Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82: 159-167.
- Williams G. M. y A. S. Nelson. 2018. Spatial variation in specific leaf area and horizontal distribution of leaf area in juvenile western larch (*Larix occidentalis* Nutt.). *Trees*, 1-11.
- Yadav S. S., R. J. Redden., J. L. Hatfield., H. Lotze-Campen., y A. E. Hall. 2011. Crop adaptation to climate change. Wiley-Blackwell, A Jhony Wiley & Sons, Ltd. Oxford, UK. 595 p.
- Yang S., J. Logan., y D. L. Coffey. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology* 74: 61-74.
- Yildirim M., K. Demirel., y E. Bahar. 2017. Radiation use efficiency and yield of pepper (*Capsicum annuum* L. cv. California wonder) under different irrigation treatments. *Journal of Agricultural Science and Technology* 19: 693-705.

Yordanova M. y N. Gerasimova. 2015. Influence of different organic mulches on soil temperature during pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. Scientific Papers-Series B, Horticulture 59: 285-290.