



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

**CAMPUS SAN LUIS POTOSÍ**

**INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

**CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE *Amaranthus cruentus* y *A. hypochondriacus* DESARROLLADOS EN INVERNADERO Y CAMPO  
MEDIANTE FERTIGACIÓN**

**DIEGO MONROY PEDROZA**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, Diciembre 2017**

La presente tesis titulada: **Crecimiento y rendimiento de *Amaranthus cruentus* y *A. hypochondriacus* desarrollados en invernadero y campo mediante fertigación**; realizada por el alumno: **Diego Monroy Pedroza** 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**

**INNOVACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO:



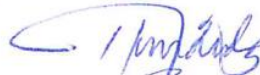
DR. GENARO OLMOS OROPEZA

DIRECTOR DE TESIS:



DR. JOSÉ DE JESÚS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. ISMAEL HERNÁNDEZ RÍOS

ASESOR:



DR. ANTONIO TRINIDAD SANTOS

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, Diciembre 2017



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

## CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el (la) que suscribe DIEGO MONROY PEDROZA, alumno(a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe 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 (la) Profesor(a) DR. GENARO OLMOS OROPEZA, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE *Amaranthus cruentus* y *A. hypochondriacus* DESARROLLADOS EN INVERNADERO Y CAMPO MEDIANTE FERTIGACIÓN. 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 (la) Consejero (a) o Director (a) 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.

Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, a 10 de enero de 2018.

\_\_\_\_\_  
DIEGO MONROY PEDROZA

Firma

\_\_\_\_\_  
DR. GENARO OLMOS OROPEZA

Vo. Bo. Profesor(a) Consejero(a) o Director(a) de Tesis

## CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE *Amaranthus cruentus* Y *A. hypochondriacus* DESARROLLADOS EN INVERNADERO Y CAMPO MEDIANTE FERTIGACIÓN

Diego Monroy Pedroza, M. C.  
Colegio de Postgraduados, 2017

Se realizaron dos experimentos de dinámica de crecimiento, eficiencia fisiológica y rendimiento de dos especies de amaranto (*Amaranthus cruentus* var. Frondosa y *A. hypochondriacus* var. Dorada) en condiciones de campo e invernadero, ambas bajo irrigación. En campo se evaluaron dos especies de amaranto (*A. hypochondriacus* y *A. cruentus*). El experimento se ubicó en Salinas, San Luis Potosí, durante el ciclo otoño-invierno 2015. Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar, con seis repeticiones. Con una densidad de 25 plantas  $m^{-2}$ . Previo a siembra, se aplicó fertilización de fondo (órgano-mineral). Durante el desarrollo del cultivo, se fertigó con: 64N-37P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-71K<sub>2</sub>O. Se realizaron cinco muestreos destructivos para evaluar variables de: altura de planta (AP), longitud de panoja (LP), diámetro de tallo (DT), área foliar (AF), materia fresca (MF) y materia seca (MS) de acuerdo a su etapa fenológica. Posteriormente, se calcularon índices fisiológicos y morfológicos. A la cosecha se determinó rendimiento, acumulación de MS e índice de cosecha (IC). Así mismo se evaluó la eficiencia del uso del agua (EUA) de MF y grano. Frondosa tuvo mayor producción de grano con 2.3 t  $ha^{-1}$  e IC (0.18), con mejor EUA (7.1 kg  $mm^{-1}$ ) ( $P<0.05$ ). Por su parte Dorada produjo mayor MF con 69.6 t  $ha^{-1}$  y más EUA (194.7 kg  $mm^{-1}$ ), pero tuvo menor IC y EUA en grano (0.12 y 4.35 kg  $mm^{-1}$ , respectivamente) ( $P<0.05$ ). En invernadero se evaluaron en el ciclo otoño-invierno 2015 dos especies de amaranto (*A. hypochondriacus* y *A. cruentus*), bajo tres tratamientos de irrigación (150, 200 y 250 ml planta  $día^{-1}$ ); con un arreglo factorial completo (3 X 2) y un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completamente al azar con cuatro repeticiones. Las plántulas se establecieron en sustrato de fibra de coco y fueron regadas con soluciones nutritivas acorde a su fenología. Los nutrientes y su concentración para los tres tratamientos de irrigación fue la misma. Se realizaron seis muestreos destructivos para determinar variables de: AP, LP, DT, AF, MS y MF de acuerdo a su etapa fenológica. Posteriormente, se calcularon índices fisiológicos y morfológicos. A la cosecha se determinó rendimiento, acumulación de MS e IC. Así mismo se evaluó la EUA de MF y grano. Frondosa tuvo mayor producción de grano con 3.7 t  $ha^{-1}$  e IC (0.18), con mejor EUA (11.5 kg  $mm^{-1}$ ) ( $P<0.05$ ). Por su parte Dorada produjo mayor MF con 69.6 t  $ha^{-1}$  y más EUA (194.7 kg  $mm^{-1}$ ), pero tuvo menor IC y EUA en grano (0.15 y 9.3 kg  $mm^{-1}$ , respectivamente) ( $P<0.05$ ). A mayor volumen de agua hubo más producción en las dos especies de amaranto, teniendo con 250 ml planta  $día^{-1}$  valores de MF y EUA (151.7 t  $ha^{-1}$  y 469.8 kg  $mm^{-1}$ ); así como más rendimiento de grano (5.1 t  $ha^{-1}$ ), IC (0.17) y EUA (15.9 kg  $mm^{-1}$ ) con respecto a los tratamientos.

**Palabras clave:** amaranto, dinámica de crecimiento, componentes de rendimiento, fertigación, eficiencia de uso de agua.

## **GROWTH AND YIELD OF *Amaranthus cruentus* AND *A. hypochondriacus* GROWN UNDER GREENHOUSE AND FIELD CONDITIONS USING FERTIGATION**

Diego Monroy Pedroza, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2017

Two experiments were carried out under field and greenhouse conditions, both under irrigation, to know growth dynamics, physiological efficiency, and yield of two amaranth species (*Amaranthus cruentus* var. Frondosa and *A. hypochondriacus* var. Dorada). In the field, the experiment was located in the municipality of Salinas, San Luis Potosí, and was conducted during the autumn-winter 2015 cycle. A completely randomized blocks experimental design was used, with six repetitions, and a density of 25 plants m<sup>-2</sup>. Prior to sowing, an organic-mineral soil fertilization was applied; and during its development the crop was fertilized with: 64N-37P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-71K<sub>2</sub>O. Five destructive samplings were carried out to evaluate: plant height (AP), panicle length (LP), stem diameter (DT), leaf area (AF), and fresh (MF) and dry matter (DM), according to the phenological stage. Subsequently, physiological and morphological indices were calculated. At harvest, yield, DM accumulation and harvest index (CI) were determined. Likewise, the efficiency of water use (EUA) of MF and grain was evaluated. Frondosa had the higher grain production (2.3 t ha<sup>-1</sup>) and CI (0.18), as well as a better EUA (7.1 kg mm<sup>-1</sup>) (P <0.05). On the part, Dorada produced higher MF (with 69.6 t ha<sup>-1</sup>) and more EUA (194.7 kg mm<sup>-1</sup>), but had lower IC and EUA for grain (0.12 and 4.35 kg mm<sup>-1</sup>, respectively) (P <0.05). In the greenhouse experiment, both varieties of amaranth (Frondosa and Dorada) were evaluated in the autumn-winter 2015 cycle, under three irrigation treatments (150, 200 and 250 ml plant day<sup>-1</sup>); with a complete factorial arrangement (3 X 2), and an experimental design of divided plots into a completely randomized blocks, with four repetitions. Seedlings were established on coconut fiber substrate, and were watered with nutrient solutions, according to their phenology. Nutrient sources and their concentrations for the three irrigation treatments were the same. Six destructive samplings were carried out to determine: AP, LP, DT, AF, MS and MF, according to their phenological stage. Subsequently, some physiological and morphological indices were calculated. At harvest, yield, accumulation of DM and CI were determined. Likewise, the EUA for MF and grain were evaluated. Frondosa had higher grain production (3.7 t ha<sup>-1</sup>) and CI (0.18), with better EUA (11.5 kg mm<sup>-1</sup>) (P <0.05). On the other hand, Dorada produced higher MF with 69.6 t ha<sup>-1</sup> and more EUA (194.7 kg mm<sup>-1</sup>), but had lower IC and EUA for grain (0.15 and 9.3 kg mm<sup>-1</sup>, respectively) (P <0.05). A higher volume of water had more production in both varieties, having with 250 ml plant day<sup>-1</sup> values of MF and EUA (151.7 t ha<sup>-1</sup> and 469.8 kg mm<sup>-1</sup>), as well as more grain yield (5.1 t ha<sup>-1</sup>), CI (0.17) and EUA (15.9 kg mm<sup>-1</sup>) with respect to the treatments.

**Keywords:** Amaranth, growth dynamics, yield components, fertigation, water use efficiency.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mi familia por el apoyo que me otorgó en mi formación profesional, que nunca dudó de mí y me apoyó cuando más lo necesité estando lejos de ellos, orando y teniéndome en su mente.

A Saraí, mi amiga y compañera de vida, que me apoyo en todas las etapas de la investigación; por tu compañía con risas, enojos, lágrimas, sueños, viajes...

## AGRADECIMIENTOS

Al ecuable, inaudible e inasible.

A CONACYT por el apoyo económico otorgado para realizar esta maestría, mi más sincero agradecimiento.

A las Fundaciones PRO DIEGO, BITCOIN y ETHEREUM que me apoyaron durante el 3er año de maestría que no recibí financiamiento, ya que sin su apoyo no habría podido concluir el presente trabajo.

Al Dr. J Jesús Martínez Hernández por su enseñanza, apoyo y confianza. Piezas fundamentales para mi superación académica.

Al Dr. Genaro Olmos Oropeza que institucionalmente apoyó esta investigación como Profesor Consejero.

Al Dr. Ismael Hernández Ríos que institucionalmente apoyó esta investigación como Profesor Asesor.

Al Dr. Antonio Trinidad Santos por su apoyo e interés en diversas etapas de mi formación.

A la Dra. Margarita Torres Aquino por demostrar su vocación, al apoyar y asesorar esta tesis todo el tiempo sin pertenecer al Consejo Particular.

Al Campus SLP por la honorabilidad de quienes integran esta institución.

Al personal que labora en el campus (Lidia, Karina, Normita, Lety, Eva, Susy y en especial a la M.C. Clarita, quien a pesar de las limitaciones del laboratorio presta su apoyo para sacar adelante el trabajo).

A la M.C. Tita, Lic. Dulce, Diana; a los técnicos Ing. Daniel, Ing. Andrés y Lic. Humberto, así como toda la gente que me apoyo en distintas etapas de la investigación.

A las amistades y compañeros de la maestría.

A la gente de Salinas de Hidalgo que recibe con los brazos abiertos a los estudiantes del Campus SLP.

## CONTENIDO

<b>Capítulo I. Introducción general.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo II. Revisión de literatura .....</b>	<b>3</b>
2.1. Origen y aspectos históricos del amaranto.....	3
2.2. Taxonomía .....	5
2.3. Morfología .....	6
2.4. Fisiología del amaranto.....	7
2.4.1. Germinación.....	8
2.4.2. Crecimiento vegetativo. ....	8
2.4.3. Floración. ....	9
2.4.4. Madurez fisiológica.....	9
2.5. Genética .....	9
2.6. Características nutricionales del amaranto.....	10
2.6.1. Características nutricionales de la hoja de amaranto .....	11
2.6.2. Características nutricionales de la semilla de amaranto.....	13
2.7. Características nutraceuticas del amaranto .....	15
2.8 Usos del amaranto.....	16
2.8.1. Alimentación humana .....	16
2.8.2. Efectos en la salud.....	18
2.8.3 Alimentación animal .....	19
2.8.4. Aplicaciones ambientales.....	23
2.8.5. Productos alternativos .....	24
2.9. Exigencias ecológicas del cultivo de amaranto.....	25
2.10. Prácticas agronómicas en la producción de amaranto.....	28
2.10.1. Preparación de las camas de cultivo y siembra .....	28
2.10.2. Densidad de siembra .....	29
2.10.3. Labores de cultivo.....	31
2.10.4. Fertilización .....	31
2.10.5. Riego .....	36
2.10.6. Cosecha .....	38



2.11. Plagas y enfermedades .....	39
2.12. Análisis de crecimiento vegetal .....	42
2.13. Conclusión .....	43
<b>CAPÍTULO III. DINÁMICA DE CRECIMIENTO, ACUMULACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIA SECA Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DEL AMARANTO EN EL ALTIPLANO OESTE DE SAN LUIS POTOSÍ.....</b>	<b>45</b>
3.1. Introducción .....	45
3.2. Materiales y métodos .....	47
3.3. Resultados y discusión.....	50
3.3.1. Altura, número de hojas y materia fresca.....	52
3.3.2. Área foliar .....	56
3.3.3. Componentes del rendimiento del grano.....	60
3.3.4. Acumulación de materia seca .....	61
3.3.5. Partición de la biomasa seca en estructuras de la planta .....	64
3.3.6. Índices fisiológicos de crecimiento .....	66
3.3.7. Índices morfológicos de crecimiento .....	70
3.4. Conclusiones .....	75
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DEL AMARANTO BAJO IRRIGACIÓN EN INVERNADERO.....</b>	<b>78</b>
4.1. Introducción .....	78
4.2. Materiales y métodos .....	82
4.3. Resultados y discusión.....	87
4.3.1. Altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de panoja.....	89
4.3.2. Producción de materia fresca .....	94
4.3.3. Área foliar (AF) .....	99
4.3.4. Componentes del rendimiento del grano.....	104
4.3.5. Acumulación de Materia Seca (MS).....	108
4.3.6. Indicadores Morfo-fisiológicos.....	112
4.4 Conclusiones .....	123
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>126</b>
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>137</b>
<b>CAPÍTULO VII. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>139</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>CAPITULO II</b>		<b>PÁGINA</b>
<b>Cuadro 1</b>	Composición nutrimental aproximada de las hojas de <i>Amaranthus hybridus</i> L. (Akubugwo <i>et al.</i> , 2007)	11
<b>Cuadro 2</b>	Comparación de calidad biológica de hoja de amaranto con acelga (Arellano <i>et al.</i> , 2004)	12
<b>Cuadro 3</b>	Composición mineral de las hojas de <i>Amaranthus hybridus</i> L. (Akubugwo <i>et al.</i> , 2007)	12
<b>Cuadro 4</b>	Contenido de proteína y aminoácidos en amaranto, maíz y trigo (Paredes <i>et al.</i> , 2006; Bourges <i>et al.</i> , 2009)	13
<b>Cuadro 5</b>	Composición nutritiva del grano en especies de amaranto ( <i>Amaranthus spp</i> ) (Schmidt, 1977; Carlsson, 1980; Becker <i>et al.</i> , 1981; Morales <i>et al.</i> , 2000)	14
<b>Cuadro 6</b>	Contenido nutrimental de dos variedades de amaranto fresco y Ensilado (Seguin <i>et al.</i> , 2013)	21
<b>Cuadro 7</b>	Contenido nutrimental de ensilado de maíz y amaranto (Rezaei <i>et al.</i> , 2013).	22
<b>CAPITULO III</b>		
<b>Cuadro 8</b>	Índices de crecimiento empleados en fisiología vegetal y de cultivos, adaptado de Hunt, 1978 y Gardner <i>et al.</i> , 1985.	49
<b>Cuadro 9</b>	Distribución de la precipitación y el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas promedio de 12 años (2000-2011) y durante el periodo en que se desarrolló el experimento (2015) (Estación climática de campo experimental “La huerta”, del Colegio de Postgraduados, Campus SLP).	51
<b>Cuadro 10</b>	Altura de planta (cm), número de hojas (planta) durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas.	52
<b>Cuadro 11</b>	Días grado de crecimiento (DGC °C) acumulados durante el desarrollo y crecimiento en las dos variedades de amaranto estudiadas.	55
<b>Cuadro 12</b>	Producción de materia verde obtenida a días después de plantación (DDP) por planta (g) y en t ha <sup>-1</sup> (valores en paréntesis) durante el desarrollo y crecimiento de las dos variedades de amaranto estudiadas.	55
<b>Cuadro 13</b>	Valores de área foliar (cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) determinados a días después de plantación (DDP) de las dos variedades de amaranto estudiadas.	58
<b>Cuadro 14</b>	Longitud (cm), peso de la panoja (g), rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> ), eficiencia en uso de agua (kg mm <sup>-1</sup> ), índice de cosecha (%) y número de granos (g <sup>-1</sup> ) determinados al fin del ciclo de cultivo de las dos variedades de amaranto estudiadas.	60
<b>Cuadro 15</b>	Modelos matemáticos obtenidos en la acumulación de biomasa total (PST), en hoja (PSH), en tallo (PSTa), en Panoja (PSP) y en raíz (PSR) en las dos variedades de amaranto, expresados como DDP (x).	63

<b>Cuadro 16</b>	Coefficientes de partición de materia seca (%) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto evaluadas.	64
<b>Cuadro 17</b>	Valores de índices de crecimiento fisiológicos: Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN) y Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.	67
<b>Cuadro 18</b>	Valores de índices de crecimiento morfológico: Área foliar específica (AFE), Duración del área foliar (DAF), Índice de área foliar (IAF), Razón de área foliar (RAF) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.	71
<b>Capítulo IV</b>		
<b>Cuadro 19</b>	Índices de crecimiento empleados en fisiología vegetal y de cultivos, adaptado de Hunt, 1978 y Gardner <i>et al.</i> , 1985.	86
<b>Cuadro 20</b>	Temperaturas, máxima, media y mínima registradas dentro del invernadero durante el ciclo del cultivo de amaranto.	87
<b>Cuadro 21</b>	Efecto de las láminas de irrigación sobre la altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de panoja del cultivo de amaranto.	89
<b>Cuadro 22</b>	Altura de planta (cm), diámetro de tallo (cm), número de hojas (planta <sup>-1</sup> ) y longitud de panoja (cm) determinada en las dos variedades de amaranto a distintos días después del trasplante (DDT).	93
<b>Cuadro 23</b>	Valores de materia fresca (g planta <sup>-1</sup> ) obtenidos por tratamiento de irrigación (150, 200 y 250 ml planta <sup>-1</sup> ) y variedades de amaranto (Dorada y Frondosa) en distintos días después del trasplante (DDT).	95
<b>Cuadro 24</b>	Valores de área foliar (AF) obtenidos por tratamiento de irrigación y variedades de amaranto en distintos días después del trasplante (DDT).	101
<b>Cuadro 25</b>	Grados días de crecimiento (GDC °C) requeridos por las variedades de amaranto Dorada y Frondosa, en cada etapa fenológica.	104
<b>Cuadro 26</b>	Peso de panoja, grano, rendimiento de grano, eficiencia en uso de agua, número de granos (g <sup>-1</sup> ) e índice de cosecha determinados al final del ciclo, como respuesta a las láminas de riego aplicadas.	105
<b>Cuadro 27</b>	Peso de panoja, grano, rendimiento de grano, eficiencia en uso de agua, número de granos (g <sup>-1</sup> ) e índice de cosecha determinados al final del ciclo, en las variedades estudiadas.	107
<b>Cuadro 28</b>	Producción de materia seca (MS) por planta (g): raíz, tallo, hoja y panoja, en respuesta a las láminas de riego estudiadas.	108
<b>Cuadro 29</b>	Producción de materia seca total (MST) por planta (g) durante todo el ciclo en respuesta a las láminas de riego estudiadas.	110
<b>Cuadro 30</b>	Producción de materia seca total (MST) (g planta <sup>-1</sup> ) durante todo el ciclo de las dos variedades estudiadas.	111
<b>Cuadro 31</b>	Valores de índices de crecimiento fisiológicos del amaranto: Tasa absoluta de crecimiento (TAC), Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN), en las tres láminas de irrigación.	112
<b>Cuadro 32</b>	Valores de índices morfológicos del amaranto: Razón de área foliar (RAF), Razón de peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago en las	115

	tres láminas de irrigación.	
<b>Cuadro 33</b>	Valores de índices de crecimiento fisiológicos del amaranto: Tasa absoluta de crecimiento (TAC), Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN) a diferentes días después del trasplante (DDT) en dos variedades de amaranto.	118
<b>Cuadro 34</b>	Valores de índices morfológicos del amaranto: Razón de área foliar (RAF), Razón de peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago a distintos días después del trasplante (DDT) en dos variedades de amaranto.	121

## LISTA DE FIGURAS

	<b>CAPITULO III</b>	<b>PAGINA</b>
<b>Figura 1</b>	Distribución de la precipitación y el comportamiento de las temperaturas máxima y mínima promedio de 12 años (a) y durante el periodo en que se desarrolló el experimento (2015) (b).	52
<b>Figura 2</b>	Altura de planta (cm) alcanzada durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas en días después de plantación (DDP).	54
<b>Figura 3</b>	Peso de materia fresca (g planta <sup>-1</sup> ) producida durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas en días después de plantación (DDP).	56
<b>Figura 4</b>	Área foliar (cm <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) alcanzada a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.	59
<b>Figura 5</b>	Acumulación de materia seca (g planta <sup>-1</sup> ) determinada a días después de plantación (DDP) en las variedades de amaranto Frondosa (a) y Dorada (b) estudiadas.	62
<b>Figura 6</b>	Curvas de índices fisiológicos: Tasa relativa de crecimiento (TRC) (a), Tasa de asimilación neta (TAN) (b) y Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) (c) determinadas a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.	70
<b>Figura 7</b>	Curvas de índices morfológicos de crecimiento: Área foliar específica (AFE) (a), Duración del área foliar (DAF) (b), Índice de área foliar (IAF) (c) y Relación de área foliar (RAF) (d) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.	75
	<b>CAPITULO IV</b>	
<b>Figura 8</b>	Altura de planta (cm) (a) y diámetro de tallo (cm planta <sup>-1</sup> ) (b) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a tres láminas de irrigación (250, 200 y 150 ml).	90
<b>Figura 9</b>	Número de hojas (planta) (a) y longitud de panoja (cm planta <sup>-1</sup> ) (b) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a tres láminas de irrigación (250, 200 y 150 ml).	92
<b>Figura 10</b>	Materia fresca (g planta <sup>-1</sup> ) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a las tres láminas de irrigación (a) y dos variedades de amaranto (b) estudiadas.	96
<b>Figura 11</b>	Materia fresca (g planta <sup>-1</sup> ) y área foliar específica (AFE cm <sup>2</sup> g planta <sup>-1</sup> ) en diferentes días después del trasplante (DDT) en respuesta a las láminas de irrigación: 250 ml (a), 200 ml (b) y 150 ml (c).	98
<b>Figura 12</b>	Materia fresca (g planta <sup>-1</sup> ) y área foliar específica (cm <sup>2</sup> g planta <sup>-1</sup> ) en diferentes días después del trasplante (DDT) en respuesta a las variedades estudiadas: Dorada (a) y Frondosa (b).	99
<b>Figura 13</b>	Área foliar (AF) (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) determinada a días después de trasplante (DDT), en respuesta a las tres láminas de irrigación (a) y variedades de amaranto (b) estudiadas.	103
<b>Figura 14</b>	Distribución de materia seca de las diferentes estructuras de la planta de	109

amaranto: raíz (a), tallo (b), hoja (c) y panoja (d) en los tratamientos de irrigación de 250 y 150 ml por planta.

**Figura 15** Materia seca total ( $\text{g planta}^{-1}$ ) durante el ciclo de cultivo, en respuesta a las tres láminas de irrigación estudiadas.

111

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El amaranto (*Amaranthus* spp) es un cultivo importante en diferentes regiones semiáridas de México. Esto es debido a que la planta muestra una excepcional plasticidad agronómica, además de un ciclo fotosintético C4 que le permite tolerancia a la sequía y un rápido crecimiento en condiciones de altas temperaturas. Además, es una planta adaptable a un amplio rango de ambientes, principalmente donde el clima es bastante severo, debido a la elevada temperatura y luminosidad, además de crecer bien en suelos que generan condiciones de estrés salino e hídrico (Macler y MacElroy, 1989; Jacobsen y Sherwood, 2002; Taboada y Guadarrama, 2007; Avasthi *et al.*, 2011).

Entre los factores agronómicos a considerar para una producción sostenible del amaranto se encuentra el manejo de suelo. Debido a que generalmente la planta se cultiva bajo condiciones de poco aporte de fertilizantes y de agua, se reducen las posibilidades de lograr un rendimiento potencial y hacer uso eficiente de agua y de nutrimentos. Ante estas condiciones, los rendimientos obtenidos de las parcelas de amaranto son generalmente marginales, alrededor de 1.0 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2017). No obstante, el amaranto actualmente se cultiva en diferentes latitudes como grano con alto contenido de proteína o como verdura, además de su potencial como insumo para la alimentación del ganado.

Las áreas productoras de amaranto podrían mejorar notoriamente a corto plazo, mediante prácticas de conservación y manejo de la fertilidad de suelos en conjunto con la aplicación de riego y nutrición eficiente. Lamentablemente poca investigación se encuentra disponible sobre sistemas de producción, donde la combinación de la fertilización-riego-suelo, prácticas de manejo y conservación de suelos estén orientados a optimizar el uso de los limitados recursos de las regiones áridas.

Actualmente, las investigaciones sobre la producción primaria se han enfocado en estudiar factores como variedad, fertilización y densidad de plantas por hectárea. Sin embargo, la interacción entre estos factores y la capacidad de la planta para adaptarse a las condiciones ambientales no han permitido definir las condiciones óptimas para el cultivo, siendo la nutrición y la demanda hídrica algunos de los factores más limitantes para su crecimiento. Tal vacío justifica el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Con base en las ventajas que la fertigación aporta dentro de la agricultura moderna y sostenible se justifica su utilización cada vez en mayor cuantía; especialmente combinado con el riego localizado, aplicándose en suelo como en sistemas hidropónicos con sustrato inerte. Sin embargo, la aplicación de estos conceptos se ha visto limitada por la falta de información técnica. Esta carencia de investigación en el tema también afecta al desarrollo de políticas y estrategias adecuadas para apoyar un desarrollo rural y agrícola sostenible a largo plazo en las zonas productoras de amaranto.

De ahí que la investigación a desarrollar tiene como objetivo generar conocimiento sobre la técnica de fertigación para lograr un manejo adecuado del complejo sustrato-agua-planta para el cultivo de amaranto que incluya el concepto de sostenibilidad.

Específicamente, se espera que a mediano plazo los usuarios potenciales logren familiarizarse con los conceptos y avances de técnica de fertigación para impulsar la producción, bajo condiciones restrictivas del recurso hídrico ante el contexto actual del cambio climático. Lo anterior es para establecer una metodología para la elaboración de una estrategia eficaz en la aplicación de agua y fertilizantes en los momentos claves de crecimiento del amaranto con el fin de optimizar los recursos.



## CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Origen y aspectos históricos del amaranto

El amaranto (*Amaranthus* spp) es una planta autóctona que se domesticó y cultivó en América (Sauer, 1976). Las evidencias históricas más antiguas del grano de amaranto provienen de una excavación arqueológica en una caverna localizada en el Valle de Tehuacán, en el estado de Puebla, México. Encontrándose semillas de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* que datan de hace 6000 y 3500 años respectivamente (Sauer, 1993). Los pueblos nahuas de México representan las principales referencias del uso del amaranto, donde el cultivo estuvo presente en varios ámbitos de la vida cotidiana (Velasco, 2016).

El amaranto se cultiva actualmente en diferentes latitudes del mundo, pero el proceso de distribución de las especies es polémico. Sauer (1950; 1976) presentó varias pruebas de fuentes arqueológicas, históricas y folklóricas puntualizando al Nuevo Mundo como el centro de origen y domesticación de los amarantos para grano. Además, menciona cuatro regiones de amaranto en las Américas, cada una con su propia especie cultivada: En el centro de México *A. hypochondriacus*, Guatemala con *A. cruentus*, los Andes teniendo *A. Caudatus* y en Argentina *A. Edulis*.

Recientes estudios han probado los orígenes filogenéticos del amaranto de grano, usando frecuentemente técnicas moleculares. Basados en marcadores genéticos comunes, se ha encontrado una estrecha relación entre *A. caudatus*, *A. hypochondriacus* y *A. cruentus*, teniendo las tres especies un origen monofilético derivado de *A. hybridus* (Brenner *et al.*, 2000).

La historia de la difusión del amaranto de grano en el viejo mundo no es claro; sin embargo, *A. hypochondriacus* fue reportado en los jardines europeos como una planta ornamental durante el siglo XVI; además fue utilizado como un cultivo menor en Rusia y Este de Europa durante el siglo XVIII (NAP, 1984, Vargas, 2002).

El grano de amaranto presumiblemente fue introducido por en el siglo XIX en África y Asia, teniendo *A. hypochondriacus* gran aceptación en la India, sobre todo en las zonas montañosas donde actualmente sigue cultivándose (Joshi y Rana, 1991; Sauer, 1993). A mediados de la década de los 90's del siglo XX, el Sur de Asia fue la única región del mundo donde la producción de grano de amaranto estuvo incrementándose (Brenner *et al.*, 2000).

A pesar de la antigüedad del cultivo, en la sociedad moderna se desconocía el potencial agrícola del amaranto, redescubriéndolo y generando interés hasta los 1970's, debido a las evidencias de la alta calidad nutrimental del grano (Senft, 1979). A partir de esto, promotores claves como Robert Rodale destinaron recursos para la investigación en amaranto, logrando incrementos en la producción en los Estados Unidos durante los 1980's y 1990's. También se generaron variedades mejoradas de *A. hypochondriacus*, las cuales son destinadas principalmente a mercados de alimentos saludables (Brenner *et al.*, 2000).

Los principales productores de amaranto a nivel mundial son China, India y Perú. En el contexto nacional, en 2015 se reportaron 6 mil ha del cultivo con un rendimiento de 1.3 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2017). Los principales estados productores se localizan en el centro del país siendo Tlaxcala, Puebla y Morelos los más destacados, recientemente San Luis Potosí ha incursionado en el cultivo y empieza a figurar dentro de los estados productores (SIAP, 2016). Además, en el contexto actual de cambio climático se considera que el amaranto puede ayudar a diversificar la producción contribuyendo a la seguridad alimentaria (Jacobsen *et al.*, 2012).

## 2.2. Taxonomía

El cultivo del amaranto se ha desarrollado en diferentes culturas y épocas. Se considera que el 44% de las especies de amaranto provienen de América, incluyendo las principales productoras de grano; siendo las especies restantes originarias de otros continentes (Costea y DeMason, 2001). La familia *Amaranthaceae* está compuesta por 70 géneros, de los cuales *Amaranthus* comprende 87 especies; aunque éste número no es definitivo debido a la hibridación que ocurre regularmente en éste género (Costea y Demason, 2001; Judd *et al.* 2008; García *et al.*, 2010). A pesar de ésta diversidad, las principales especies a partir de las cuales se han generado los cultivares actuales productores de grano son *Amaranthus hypocondriacus*, *A. caudatus* y *A. cruentus* (Lanoue *et al.*, 1996; Ramírez, 2010).

La clasificación taxonómica del amaranto es la siguiente (Barrales *et al.*, 2010):

- División: Magnoliophyta o *Embriophita sphonogamia*
- Subdivisión: *Angiospermae*
- Clase: Magnoliopsida o *Dicotyledonae*
- Subclase: Caryophyllidae o *Arcichomydae*
- Orden: Caryophyllales
- Familia: *Amaranthaceae*
- Sub-familia: *Amaranthoideae*
- Género: *Amaranthus*
- Especie: *spp*

### 2.3. Morfología

El amaranto es una herbácea anual, con tallo recto, su inflorescencia varía en tamaño y colores. Realiza la fotosíntesis mediante la vía C<sub>4</sub>, lo que le permite incrementar la eficiencia de uso de CO<sub>2</sub> en un amplio rango de temperatura (desde 25 a 40 °C), con alta intensidad de luz y con estrés de humedad (NAP, 1984; Morales *et al.*, 2014).

Su raíz es pivotante con múltiples raicillas delgadas, que se extienden rápidamente después de que el tallo empieza a ramificarse, facilitando la absorción de agua y nutrientes (Mujica y Berti, 1997). Mientras que su tallo es cilíndrico y anguloso con gruesas estrías longitudinales que le dan una apariencia acanalada, éste alcanza de 0.4 a 3 m de longitud, cuyo grosor disminuye de la base al ápice; presenta distintas coloraciones que generalmente coinciden con el color de las hojas, aunque a veces se observan estrías de diferentes colores. Las ramificaciones en muchos casos comienzan desde la base o a media altura y se originan en las axilas de las hojas. La cantidad de ramificaciones depende de la densidad de población del cultivo. El color del tallo es variable, va desde un color blanco amarillento hasta verde claro, inclusive rojo vinoso (Sumar, 1982).

Las hojas son pecioladas, sin estípulas de forma oval, elíptica, dispuestas de forma alterna u opuestas con nervaduras prominentes en el envés, lisas o poco pubescentes de color verde o púrpura, cuyo tamaño disminuye de la base al ápice, presentando borde entero de tamaño variable de 6.5 a 15 cm (Sumar, 1993; Tapia, 2000). Las hojas también varían en su forma; pueden ser romboides, lisas y de escasa o nula pubescencia (Mujica y Berti, 1997).

Respecto a la flor, el amaranto posee grandes inflorescencias terminales o axilares que llegan a medir hasta 90 centímetros de largo y pueden ser decumbentes, semierecta y erectas,

adoptando formas glomerulares o amarantiformes, densas, laxas o compactas; de colores amarillo, anaranjado, café, rojo, rosa o morado. Tiene flores unisexuales, estaminadas ubicadas en el ápice del glomérulo y pistiladas que se encuentran en un eje central sin hojas denominado espiga. Debido a esto, su polinización es predominantemente autógama y con cierto porcentaje de polinización cruzada (Tapia, 2000; Ramírez, 2010). En las flores estaminadas hay cinco estambres de filamentos delgados y largos terminados en anteras que se abren en dos sacos, las flores pistiladas tienen un ovario semiesférico que contiene solo un óvulo, con tres ramas estigmadas (Sumar, 1982).

Anatómicamente, el fruto es un pixidio unilocular, es decir, una cápsula, que cuando madura presenta dehiscencia transversal, lo que facilita la caída de la semilla (Sánchez, 1980; Nieto, 1990). En el grano se pueden diferenciar tres partes: la cubierta, conocida como epispermo, una segunda capa que está formada por los cotiledones y es la parte más rica en proteína, y una capa interna, rica en almidones conocida como perisperma (Nieto, 1990).

La semilla es lisa, brillante y muy pequeña; en general mide de 1 a 1.7 mm de diámetro y el número de semillas por gramo oscila entre 1,000 y 3,000. Son de forma circular y diversos colores según la variedad; así: existen granos blancos, blancos amarillentos, dorados, rosados, rojos y negros, correspondiendo generalmente éste último color a especies silvestres (Stallknecht y Schulz-Schaeffer, 1993).

#### **2.4. Fisiología del amaranto**

El amaranto es una planta  $C_4$ , siendo de las pocas especies en éste grupo que no son gramíneas. El ciclo  $C_4$  es una modificación del proceso fotosintético normal; ocurre a través de la vía de Hatch-Slack, que hace eficiente el uso del  $CO_2$  disponible en el aire concentrándolo en los

cloroplastos de células especializadas (Azcón-Bieto y Talón, 2000). Esto le confiere al amaranto ventajas sobre las plantas C<sub>3</sub>, como baja o inexistente foto-respiración; lo que conlleva mayor eficiencia en el uso del agua, mayores tasas de crecimiento y mejor eficiencia fotosintética en regiones de altas temperaturas (Azcón-Bieto y Talón, 2000). La combinación de algunas características anatómicas del amaranto y su tipo de metabolismo (C<sub>4</sub>) contribuyen a su amplia distribución y capacidad de adaptarse a condiciones ambientales diversas y adversas. Por todo ello puede ser un cultivo “alternativo” para los pequeños productores rurales, al tener menores niveles de siniestralidad que cultivos más comunes en México, en zonas de temporal difícil y aún para zonas semiáridas si se usan los métodos de cultivos adecuados.

Desde el punto de vista nutrimental, el conocimiento de las etapas fenológicas de una planta ayuda a determinar los periodos de mayor crecimiento, mayor producción de biomasa y mayor demanda nutrimental e hídrica. Por lo tanto, la extracción de nutrimentos será más fácilmente delimitada conforme a una escala biológica visible, pudiéndose aplicar de forma práctica para la nutrición de los cultivos (Carballo, 2006). En el amaranto pueden delimitarse las siguientes fases: Germinación, Crecimiento vegetativo, Floración y Madurez fisiológica (Carballo, 2006).

**2.4.1. Germinación.** Ocurre alrededor de cuatro a cinco días después de la siembra; la temperatura mínima de germinación se encuentra entre los 10 y 15 °C, dependiendo de la variedad, y la máxima es hasta los 35 °C, donde se da el mayor porcentaje de germinación (Cristaudo *et al.*, 2007; Taboada y Guadarrama, 2007).

**2.4.2. Crecimiento vegetativo.** Dependiendo de las condiciones ambientales, durante esta etapa la planta puede desarrollar de una a dos hojas por día y la panoja puede presentar un crecimiento de 50% (Carballo, 2006).

**2.4.3. Floración.** Se presentan flores estaminadas y pistiladas; las primeras ubicadas en el ápice de la panoja y las segundas en la parte inferior de la misma estructura. El inicio de la floración varía según la especie, pero en general se considera que ésta inicia cuando la panoja está desarrollada en al menos la mitad de su crecimiento. Las flores se observan abiertas, mostrando los estambres separados y el estigma visible (Tapia, 2000; Carballo, 2006).

**2.4.4. Madurez fisiológica.** La coloración de la panoja es el indicador más utilizado para determinar la madurez fisiológica. Panojas verdes cambian a color amarillento y panojas rojas a color café rojizo. Además, al sacudir la panoja las semillas maduras caen. También se puede determinar al oprimir con los dedos una semilla, obtenida de la parte media de la inflorescencia principal, y ésta no puede macerarse (Carballo, 2006).

## **2.5. Genética**

Debido a las propiedades nutrimentales y de adaptación del amaranto a diversas condiciones ambientales, ha incrementado en los últimos años la atención en el genoma de la planta. Sin embargo, se tiene limitada información sobre la diversidad y relación intraespecífica e interespecífica del cultivo, lo cual es importante para hacer un uso eficiente del germoplasma (Mallory *et al.* 2008). En el género *Amaranthus* se presentan especies con 16 y 17 cromosomas, exceptuando *A. dubius*, que tiene 32 (Greizerstein y Poggio, 1995). Se sabe que el genoma de *A. caudatus* tiene un tamaño medio de 501.93 mega pares de bases (Stetter *et al.*, 2017); además, esta especie tiene mayor relación con *A. hypochondriacus* y un parentesco más lejano con *A. cruentus* (Legaria, 2010).

A pesar de las actuales herramientas genómicas, el genoma del amaranto todavía no se conoce completamente, debido a la plasticidad genética, la cual contribuye a las características

de adaptación, al tamaño del genoma, así como a la diversidad en el número de cromosomas y al proceso de hibridación que se da dentro del género (Wassom y Tranel, 2005; Khaing *et al.*, 2013). La gran diversidad genética y fenotípica del cultivo lo convierten en un buen candidato para generar nuevas variedades con mejores características productivas, pero la disposición de las flores y su fecundación por autopolinización y entrecruzamiento dificultan el proceso de fitomejoramiento, aunque no afectan negativamente el mejoramiento o heterosis (Jacobsen y Sherwood, 2002; Moose y Mumm, 2008; Olsen y Wendel, 2013).

## **2.6. Características nutricionales del amaranto**

El amaranto posee un alto potencial agroalimentario, ya que su semilla, planta y hojas poseen valores nutricionales que sobrepasan a los cereales de uso común, por lo que para consumo humano y animal está ampliamente recomendado. La literatura reporta que las hojas de *A. hybridus* contienen apreciables contenidos de proteínas, grasas, fibra, carbohidratos y valor calorífico (Cuadro 1); además contienen elementos minerales, vitaminas, y aminoácidos (Schmidt *et al.*, 1974; Escudero *et al.*, 1999; Akubugwo *et al.*, 2007; Belanger *et al.*, 2010).

Sin embargo, el análisis químico no debe ser el único criterio para juzgar el valor nutricional de esta planta. Es necesario considerar otros aspectos, tales como la evaluación biológica del contenido de nutrimentos de la planta para determinar la biodisponibilidad de los nutrimentos y también los efectos del procesamiento sobre el valor nutritivo y químico de la planta.

En general, las características nutrimentales de hoja y grano de amaranto se ven influidas por las condiciones ambientales, las prácticas agronómicas y la nutrición del cultivo (Shulka y Singh, 2000).



**Cuadro 1.** Composición nutrimental aproximada de las hojas de *Amaranthus hybridus* L.

<b>Parámetro</b>	<b>Concentración (% Materia seca)</b>
Contenido de humedad	83.48
Contenido de cenizas	13.80
Proteína cruda	17.92
Lípido crudo	4.65
Fibra cruda	8.61
Carbohidratos disponibles	52.18
Valor Calorífico (Kcal/100g)	268.92

Akubugwo *et al.*, 2007.

### **2.6.1. Características nutricionales de la hoja de amaranto**

La parte foliar del amaranto es una fuente rica en nutrimentos. Sin embargo, es recomendable comer las hojas tiernas y cocidas para evitar agentes antinutricionales, como los oxalatos y nitritos, los cuales disminuyen la absorción de calcio y alteran la transportación del oxígeno en la sangre, respectivamente. El primer componente se acumula en mayores cantidades en condiciones limitantes de agua, mientras que el segundo ocurre a causa de un exceso de fertilización nitrogenada (Becerra, 2000; Savage *et al.*, 2000; Paredes-López *et al.*, 2006).

La hoja es una fuente de proteína (Cuadro 2). En algunos países se consume como verdura, sustituyendo a la acelga (*Beta vulgaris*) y la espinaca (*Spinacia oleracea*); siendo más apetecible durante las etapas tempranas de crecimiento de la planta, ya que conforme se desarrolla se vuelve más fibrosa a causa de la lignificación (Arellano *et al.*, 2004). También, se reporta que con el tiempo el cultivo disminuye la concentración de proteínas crudas, pero aumenta la de hierro (Paredes *et al.*, 1990; Achigan-Dako *et al.*, 2014). En la estructura foliar, la

proteína tiene alto contenido de aminoácidos como el ácido aspártico, la glicina, la lisina y el ácido glutámico (Akubugwo *et al.*, 2007). Además, las hojas pueden utilizarse como especie forrajera para el ganado (Pond y Lehmann, 1989; Fasuyi *et al.*, 2007).

**Cuadro 2.** Comparación de calidad biológica de hoja de amaranto con acelga.

	<i>Amaranthus dubius</i>	<i>Beta vulgaris L.</i>
<b>Contenido neto de proteína (%)</b>	55	56
<b>Digestibilidad verdadera (%)</b>	66	76
<b>Valor biológico (%)</b>	83	74

Arellano *et al.*, 2004.

Además de proteína, la hoja de amaranto aporta otros nutrientes, como se muestra en el Cuadro 3, así como betacarotenos, ácido ascórbico y vitaminas del complejo B (Schmidt *et al.*, 1974; Escudero *et al.*, 1999; Belanger *et al.*, 2010).

**Cuadro 3.** Composición mineral de las hojas de *Amaranthus hybridus L.*

<b>Nutriente</b>	<b>Composición (mg/100 g)</b>
Sodio (Na)	7.43
Potasio (K)	54.20
Calcio (Ca)	44.15
Magnesio (Mg)	231.22
Hierro (Fe)	13.58
Zinc (Zn)	3.80
Fósforo (P)	34.91
Relación Na/K	0.14

Akubugwo *et al.*, 2007.

## 2.6.2. Características nutricionales de la semilla de amaranto

El grano de amaranto posee aproximadamente un 17.5% de proteína; valor mayor que el de los cereales tradicionales: el maíz 10.0% y el trigo 13.0%. Sin embargo, su importancia no sólo radica en la cantidad de proteína sino en la calidad de la misma, con un excelente balance de aminoácidos esenciales, destacando triptófano, metionina y lisina (Cuadro 4). Siendo éste último un aminoácido importante en la alimentación humana, que comúnmente es limitante en otros cereales (Tosi *et al.*, 2001; Abalone *et al.*, 2004; Calzetta *et al.*, 2004; Paredes-López *et al.*, 2006; Bourges *et al.*, 2009).

**Cuadro 4.** Contenido de proteína y aminoácidos en amaranto, maíz y trigo.

Componente	Amaranto	Maíz	Trigo
Proteína cruda (%)	17.5	10.0	13.0
Lisina (g 100 g proteína <sup>-1</sup> )	6.1	3.0	3.0
Triptófano (g 100 g proteína <sup>-1</sup> )	1.3	0.7	1.2
Metionina (g 100 g proteína <sup>-1</sup> )	2.3	2.0	1.7

Paredes-López *et al.*, 2006; Bourges *et al.*, 2009.

El componente que se encuentra en mayor proporción en la semilla del amaranto es el almidón, que representa entre 50 y 60% de su peso seco. Las reducidas dimensiones del gránulo de almidón del amaranto (1 a 3  $\mu\text{m}$ ) facilitan su digestión, que resulta de 2.4 a 5 veces más rápida que el almidón de maíz (Radosavljevic *et al.*, 1998; Tosi *et al.*, 2002).

Además de proteína, el amaranto aporta otros nutrimentos (Cuadro 5) como vitaminas del complejo B, lípidos, fibra, hidratos de carbono y minerales como calcio, magnesio y hierro (Morales *et al.*, 2000). En grano, al igual que en hoja, encontramos factores antinutricionales como el oxalato, además de otros componentes como el ácido fítico y el inhibidor de la tripsina,

los cuales disminuyen el aprovechamiento de fósforo y proteínas, respectivamente (Bressani y Ligorria, 1994); aunque se ha observado que debido a los bajos niveles en que se encuentran éstos y al alto contenido de minerales y proteínas, no generan un efecto negativo de importancia (Gelinas y Seguin, 2007). Por su parte, en las especies de amaranto de grano negro se ha encontrado la presencia de taninos, los cuales llegan a secuestrar algunos nutrimentos (Paredes *et al.*, 1990).

**Cuadro 5.** Composición nutritiva del grano en especies de amaranto (*Amaranthus spp.*).

Componente	<i>A. Caudatus</i>	<i>A. Cruentus</i>	<i>A. Hypochondiacus</i>
	100 g materia seca <sup>-1</sup>		
Extracto etéreo (g)	6	6	6.1
Fibra cruda (g)	4	2.9	5
Cenizas (g)	2	2.7	3.3
Hidratos de carbono (g)	65	67.2	62
Energía (kcal)	360	372	370
Tiamina (g)	0.1	0.1	0.2
Ribofavina (g)	0.2	0.2	0.2
Niacina (g)	1.1	1.1	1.1

Schmidt, 1977; Carlsson, 1980; Becker *et al.*, 1981; Morales *et al.*, 2000.

Si bien no son intrínsecas al grano, las aflatoxinas producidas por *Aspergillus flavus* se desarrollan en leguminosas, cereales y pseudocereales como el amaranto. Este compuesto tiene efecto antinutricional y actividad carcinogénica (CAST, 1989). Estos hongos pueden generarse en amaranto desde un 17.7% de humedad; sin embargo, en comparación con otros granos, es poco susceptible a la contaminación por micotoxinas. Para evitar presencia de hongos durante el

almacenamiento, se recomienda tener una humedad máxima de 13.5% y temperatura de 25 °C, considerando riesgoso almacenar a partir de una humedad del 17% (Bresler *et al.*, 1998).

## **2.7. Características nutraceuticas del amaranto**

Además del valor nutricional del amaranto, en los últimos años se han investigado las propiedades nutraceuticas y sus efectos en la salud. El escualeno y los tocoferoles son los componentes más bioactivos presentes en la fracción lipofílica del grano (Kraujalis y Venskutonis, 2013). El primero tiene características que ayudan a reducir el colesterol sérico, además de tener efecto antioxidante tres veces superior al de la vitamina C, por lo que contribuye a disminuir la incidencia de cáncer (Newmark, 1997; Rao *et al.*, 1998). El escualeno se encuentra en altas concentraciones en la grasa de tiburón (1%) y ballena, también lo contienen la mayoría de los aceites vegetales, pero en baja proporción. A diferencia de otros aceites como el de oliva y de palma, que contienen alrededor del 0.5-0.8%, el aceite de amaranto tiene un porcentaje de escualeno entre el 2-8%, por lo que se le considera una fuente alternativa y de bajo costo a las de origen animal (Czaplicki *et al.*, 2011; Kraujalis y Venskutonis, 2013). Los segundos, aunque en menor medida, (2.97-15.65 mg kg<sup>-1</sup>), también se encuentran en la parte lipofílica del grano en la forma de  $\alpha$ -tocoferol, teniendo éste una alta actividad como antioxidante (Lehmann *et al.*, 1994; Brigelius-Flohé *et al.*, 2002).

Otro antioxidante importante presente en el grano, pero de naturaleza hidrofílica, son las antocianinas, las cuales en comparación con otros cultivos se encuentran en altas cantidades (90.83-103.60 mg 100 g<sup>-1</sup> de materia seca (MS)); aunque estos compuestos están en mayor proporción en las plántulas que en las semillas, teniendo la mayor acumulación a los cuatro días

de emerger y mostrando disminución en la concentración a partir del séptimo día después de la emergencia (Paško *et al.*, 2009).

En hoja también se han determinado compuestos antioxidantes como vitamina C, carotenoides, compuestos polares y no polares de fenoles, así como compuestos polares y no polares de flavonoides, con valores de 44.5, 13.2, 884.5, 72.0, 275.0, 65.0 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente, encontrándose dentro de valores similares a los de otras hortalizas, pero inferiores a los que contiene la espinaca (Oboh *et al.*, 2008).

## **2.8 Usos del amaranto**

### **2.8.1. Alimentación humana**

El interés por el amaranto se ha centrado inicialmente en la utilización del grano para la alimentación humana. La forma de consumirlo es principalmente como cereal reventado, del cual se elaboran barras de alegría (se mezcla con miel de abeja o piloncillo, semillas y frutos secos), que es un dulce típico mexicano; también se elaboran con el grano cereales, granolas, tamales, atoles, pinole, mazapán, y otros productos con su harina, como tortillas, galletas, panqués, horchata y bebidas chocolatadas.

Para reventarlo, es necesario someter al grano a temperaturas de entre 150 a 220 °C durante 10 a 25 segundos (Bressani *et al.*, 1987); aunque se ha encontrado que este proceso disminuye la cantidad y calidad de la proteína y aminoácidos (Gamel *et al.*, 2004; Písaříková *et al.*, 2005). Para mantener la calidad nutrimental y aumentar la digestibilidad de proteínas, es necesario disminuir la temperatura (100 a 160 °C) y tiempo de exposición (7 a 18 segundos) al calor, lo cual se logra remojando y secando previamente el grano (Morales *et al.*, 2014).

Para mejorar las características del grano y ampliar su consumo, éste se ha sometido a diversos procesos. Tal es el caso de la nixtamalización, que al aplicarla se ha observado que aumenta la disponibilidad de proteínas en grano, no alterando el triptófano, pero disminuyendo en un 10 a 12% el contenido de lisina. Al ser parte del proceso de la elaboración de tortillas de maíz, puede considerarse como una estrategia para enriquecer este alimento (Paredes *et al.*, 1990). Otro tratamiento es la molienda, que realizada con el grano crudo se obtienen harinas para repostería, o posterior al tostado para harinas destinadas a atoles y tamales; además se ha encontrado que con un molino diferencial, más un proceso de tamizado, se pueden generar harinas con diferentes cualidades: alta en proteína, alta en almidón o alta en fibra (Tosi *et al.*, 2001; Tosi *et al.*, 2002).

La cocción también es una alternativa, que aplicada durante 15 minutos confiere buenas características organolépticas al grano. Desde el punto de vista de calidad de proteínas, se ha observado que éste proceso realizado por 10 minutos aumenta cualidades de la proteína, pero más allá de ese tiempo reduce el contenido de proteína cruda y verdadera (Bressani y Ligorriá, 1994; Gamel, 2005). La extrusión es otra forma de procesar el grano; mediante éste tratamiento se ha encontrado aumento en la disponibilidad de proteína respecto al grano crudo (Mendoza y Bressani, 1987). Este proceso ayuda además a que se pueda emplear en productos como frituras, complementos alimenticios y harinas para repostería (Ilo *et al.*, 1999; Chávez-Jáuregui *et al.*, 2003). Se ha explorado el germinado del grano como una opción de consumo, encontrando que este tratamiento reduce el contenido de proteínas y almidones, pero incrementa el contenido de calcio y zinc, así como vitaminas del complejo B (Gamel *et al.*, 2006).

La hoja del amaranto, específicamente durante el crecimiento temprano, es una de las partes que también se utiliza para la alimentación. Entre las formas más comunes de consumo se

encuentra la cocción, la cual disminuye el contenido de compuestos benignos como los antioxidantes, y antinutricionales como nitratos y oxalatos (Savage *et al.*, 2000; Amin *et al.*, 2006). Otras formas de preparación de la hoja consisten en remojarlas en agua con sal o agua tibia y también pueden someterse a secado para consumirlas en épocas de escases (Adebooye *et al.*, 2001).

### **2.8.2. Efectos en la salud**

Se ha probado de diferentes maneras el efecto de los componentes presentes en el amaranto. El alto contenido en calcio, fibra y potasio en las hojas y los granos resulta diurético, además de benéfico para los vasos sanguíneos y la salud de los organismos en general, pudiendo actuar en el tratamiento natural de la hipertensión (Morales *et al.*, 2000; Paško *et al.*, 2011).

En ratones sometidos a radiación gamma, se ha observado que los tratados con extracto de hojas de amaranto han reducido la presencia de signos de enfermedad como diarrea, alopecia, edema facial y disminución de peso, en comparación contra los que no recibieron tratamiento. Este efecto, así como la mayor tasa de sobrevivencia, se presentó en el grupo de ratones al que se le suministro el extracto previamente a la radiación. Por eso, se sugiere que el extracto de amaranto proporciona protección contra la radiación gamma (Maharwal *et al.*, 2003). Por otra parte, en ratones con dietas altas en fructosa se les desarrolló un estado de estrés oxidativo; posteriormente, a un grupo se les adicionó en la alimentación granos de amaranto, con lo que se redujo la peroxidación de lípidos y mejoró la actividad de enzimas antioxidantes; sobre todo en sangre, pulmón y corazón, con lo que se concluyó que las semillas de amaranto pueden ayudar a proteger de forma moderada los efectos negativos de la fructosa (Paško *et al.*, 2011).



En ratas a las que se les indujo diabetes, se probó el efecto del amaranto a través de dietas que contenían el grano completo o sólo su fracción lipídica. En ambas se encontró disminución de glucosa en suero y aumento de insulina, por lo que se concluyó que la inclusión de grano y aceite de amaranto en la alimentación contribuye a corregir la hiperglucemia, así como las complicaciones que esta condición genera (Kyung *et al.*, 2006).

El gluten es una proteína presente en diferentes concentraciones en la mayoría de los cereales. Ésta participa en la enfermedad celíaca, que se produce por una condición del sistema inmune, el cual genera una reacción que daña el intestino delgado al estar en contacto con la proteína. Por lo general esta enfermedad viene acompañada de diabetes mellitus. El amaranto, al no contener gluten y tener efectos contra la diabetes, se ha considerado un alimento viable para las personas que sufren esta enfermedad (Thompson, 2001; Guerra-Matias y Arêas, 2005).

### **2.8.3 Alimentación animal**

Por sus características nutrimentales, se ha considerado al amaranto como insumo para la producción animal, siempre y cuando los precios del mercado permitan incorporarlo en la alimentación; por lo tanto, se han hecho dietas donde se incluye como ingrediente, para evaluar su efecto. En aves, el grano es la parte que más se ha empleado en la alimentación. En cuanto a la engorda de pollos, con una inclusión del 8%, sustituyendo la harina de pescado por amaranto crudo en una dieta y en otra con amaranto reventado, no se encontraron diferencias ( $p < 0.05$ ) en la conversión alimenticia (1.8), así como en la cantidad y calidad de la carne obtenida, con lo que se concluyó que el amaranto puede ser una alternativa a las harinas de origen animal (Písaříková, 2006). También se han realizado dietas de grano extrudido; sustituyendo una dieta de maíz y soya por amaranto, se observó que bajo este tratamiento puede suplirse hasta un 40% de los

granos, manteniendo la misma ganancia de peso, aunque a un porcentaje mayor de incorporación afecta negativamente la producción (Tillman y Waldroup, 1988). Con el mismo tratamiento al grano, pero en aves de postura, se encontró que el mejor porcentaje de remplazo respecto a la dieta con maíz y soya se da entre 10 a 20%, obteniendo la misma masa de producción y la misma calidad de cascaron, aunque el color de la yema se correlacionó negativamente con el aumento de inclusión de amaranto (Tillman y Waldroup, 1987).

Así mismo, en codornices, al sustituir un 4 y 7% de una fórmula propia para sus necesidades nutrimentales por grano de amaranto, en general se mantuvo la calidad química y organoléptica de la carne, alterando solamente la palatabilidad de forma negativa con el mayor porcentaje de inclusión y de forma positiva con la menor adición (Jakubowska *et al.*, 2013). En cuanto al follaje, aunque su uso se ha enfocado principalmente en la alimentación de rumiantes, también se ha probado la aplicación de las hojas de amaranto en forma de harina para la alimentación de gallinas, encontrando que este insumo puede sustituir hasta en un 10% la porción de una dieta de maíz, soya y trigo, obteniendo parámetros productivos similares (Fasuyi *et al.*, 2007).

En borregos se evaluó la producción al alimentarlos con una dieta de maíz, soya y alfalfa, comparada con otra que incluía los mismos ingredientes, pero se sustituyó en un 50% y 100% la alfalfa por amaranto, obteniendo los mismos resultados en las tres dietas sobre la ganancia de peso y en eficiencia alimentaria (Pond y Lehmann, 1989). Así mismo, se ha probado el efecto del ensilado sobre el amaranto, cosechando al inicio de la floración dos variedades (Plainsman y D136) y realizando análisis bromatológicos en ambas condiciones (Cuadro 6). Se encontró que el ensilado, comparado con el fresco, aumentó en 9, 10 y 85% el contenido de cenizas, fibra detergente ácida (FDA) y extracto etéreo (EE), respectivamente, así como la disminución en 16 y

4% de carbohidratos no estructurales y totales; además, aunque la presencia de oxalatos en el forraje fresco presentaba valores inferiores a los reportados como riesgoso para la salud en caballos y rumiantes (Radostits *et al.*, 2000), se observó que el proceso de ensilado disminuyó en 17% su presencia (Seguin *et al.*, 2013).

**Cuadro 6.** Contenido nutrimental de dos variedades de amaranto fresco y ensilado.

Componente	Fresco		Ensilado	
	Plainsman	D136	Plainsman	D136
MS g kg <sup>-1</sup>	227.00	247.00	226.09	246.75
PC g kg <sup>-1</sup>	136	152	143	150
Cenizas g kg <sup>-1</sup>	186	181	204	197
Extracto etéreo g kg <sup>-1</sup>	4.8	5.3	12.1	6.4
FDN g kg <sup>-1</sup>	401	372	401	377
FDA g kg <sup>-1</sup>	291	247	305	282
Lignina detergente ácido g kg <sup>-1</sup>	31	25	29	27
Carbohidratos totales g kg <sup>-1</sup>	674	662	641	647
Carbohidratos no estructurales g kg <sup>-1</sup>	328	349	267	300
Digestibilidad total de nutrimentos g kg <sup>-1</sup>	532	552	532	538
Energía neta (MJ kg <sup>-1</sup> )	4.94	5.15	4.94	5.01
Calcio g kg <sup>-1</sup>	12.6	12.3	14.1	13.3
Fósforo g kg <sup>-1</sup>	2.0	2.2	2.1	2.4
Oxalato g kg <sup>-1</sup>	31.2	29.0	25.4	24.8

MS: materia seca, PC: proteína cruda, FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácido. Variedades de amaranto Plainsman y D136 Seguin *et al.*, 2013.

En otra experiencia citada en la bibliografía, se cosechó maíz y amaranto cuando el grano de cada cultivo se encontraba en estado lechoso y se ensilaron por separado. Concluido el

proceso se les realizó un análisis bromatológico, encontrando mayor contenido de materia seca y proteína cruda, así como menor concentración de lignina en el ensilado de amaranto (Cuadro 7) (Rezaei *et al.*, 2013). Estos materiales se probaron como alimento, sustituyendo en la dieta el ensilado de maíz por el de amaranto, a niveles de 0, 75, 150, 225 y 300 g kg<sup>-1</sup>, encontrando que conforme aumentaba la inclusión de amaranto mejoraba la ganancia de peso total y de la canal, no alterando su composición nutrimental y organoléptica (Rezaei *et al.*, 2013). Por lo tanto, se concluyó que el amaranto tiene una composición comparable con otros insumos y se recomienda para la alimentación de rumiantes (Seguin *et al.*, 2013).

**Cuadro 7.** Contenido nutrimental de ensilado de maíz y amaranto.

<b>Componente</b>	<b>Ensilado de maíz</b>	<b>Ensilado de amaranto</b>
<b>g kg<sup>-1</sup></b>		
MS	220.00	235.00
Materia orgánica	923.00	890.00
PC	77.00	122.00
FDN	480.00	440.00
FDA	281.00	278.00
Lignina detergente ácida	45.00	35.00
EE	54.20	44.10
Ca	2.30	17.80
P	2.20	2.60
EM (MJ/kg)	10.05	9.21
pH	4.01	3.94

MS: materia seca, PC: proteína cruda, FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, EE: extracto etéreo, EM: energía metabolizable.  
Rezaei *et al.*, 2013.

#### 2.8.4. Aplicaciones ambientales

Además de la nutrición y su implicación en la salud, se ha explorado el uso del amaranto en otras áreas. Por ejemplo, el uso de la planta para la producción de biogás, cosechando *A. cruentus* con un rendimiento de 11.3 t ha<sup>-1</sup> se obtuvieron 2,700 m<sup>3</sup> de metano / ha<sup>-1</sup>. Comparado con plantas como la ortiga (*Urtica dioica*), el sorgo (*Sorghum sp.*) y el maíz (*Zea mays*), los que con rendimientos de 6.0, 9.9 y 13.0 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, obtuvieron 2200, 4500 y 4000 m<sup>3</sup> de metano ha<sup>-1</sup>; lo cual coloca al amaranto como un bajo productor de biogás, (Lehtomäki *et al.*, 2008; Seppälä *et al.*, 2012). No obstante, bajo ciertas condiciones fisiográficas puede ser una alternativa bioenergética (Seppälä *et al.*, 2013).

Se ha evaluado también el uso potencial del amaranto en fitorremediación. En un caso, en condiciones de hidroponia y expuesta a diferentes concentraciones de níquel (0, 25, 50, 100 y 150 µM), se exploró el efecto del metal sobre el amaranto (*A. paniculatus*). Se observó que una concentración de 150 µM afectaba el crecimiento de la planta, pero no disminuía la concentración del níquel en el agua a lo largo del tiempo. Por otro lado, con 25 µM, que es considerada una concentración alta para lo establecido por la normatividad ambiental, se encontró que existía tolerancia por parte de la planta y que al final logró reducir en un 60% la presencia del metal en la solución. En todos los tratamientos se observó baja translocación del contaminante, quedándose la mayor parte acumulado en la raíz. Debido a esto, y a la adaptación de la planta a la hidroponia, se tiene una perspectiva favorable hacia el uso del amaranto en la rizofiltración de aguas contaminadas con metales, acompañada de otras técnicas de purificación de agua (Iori *et al.*, 2013).

En otra experiencia, con dos especies de amaranto (*A. cruentus* y *A. tricolor*) cultivadas en suelo, evaluando la absorción del radioisótopo de <sup>134</sup>Cs en tres concentraciones (5.55×10<sup>5</sup> Bq

pot<sup>-1</sup>, 1.11×10<sup>6</sup> Bq pot<sup>-1</sup> y 1.665×10<sup>6</sup> Bq pot<sup>-1</sup>), se observó una relación directamente proporcional al incremento de <sup>134</sup>Cs en el suelo con el encontrado en los brotes de amaranto, así como diferencia de absorción entre especies y respuesta a la fertilización, ya que *A. cruentus* tuvo mayor absorción del isótopo y aumentó con la aplicación de sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), mientras que *A. tricolor* la disminuyó. Por lo anterior, se concibe el uso del amaranto para ayudar a disminuir la presencia de contaminantes, así como probar la eficiencia de absorción de otras especies del género *Amaranthus* y la participación de los fertilizantes como agentes que mejoran la eficiencia de absorción de contaminantes radioactivos (Tang *et al.*, 2003).

#### **2.8.5. Productos alternativos**

En los últimos años se han venido generando materiales alternativos al plástico, que sean respetuosos con el medio ambiente. En este sentido, se ha desarrollado un biopolímero compuesto por 100 g de harina de amaranto, 20.02 g de glicerol y 29.60 g sorbitol; este material ha mostrado resistencia física, baja permeabilidad al oxígeno y poca afinidad al agua, por lo que se considera un material adecuado para el uso de embalaje (Tapia-Blácido *et al.*, 2011).

Así mismo, por el efecto que los pigmentos sintéticos generan en la salud, se ha venido desarrollando la sustitución de éstos por otros de origen natural, siendo algunas de las limitantes para lograrlo, la poca diversidad de fuentes de pigmentos naturales y la baja producción de éstas (Kumar y Sinha, 2004). Algunos genotipos de amaranto, por su alta producción de biomasa y contenido de tintura, se han considerado para usarlos en la producción de betacianinas, que generan tonalidades de rojo, amarillo y naranja (Cai *et al.*, 2005). Por lo tanto, se probó con *A. tricolor* y *A. cruentus* la viabilidad de los pigmentos en la pasta de trigo, logrando buena pigmentación y estabilización del colorante. Además, se destaca la adición de propiedades

antioxidantes al utilizar estos pigmentos (Zhu *et al.*, 2008). Ésta misma diversidad de colores y su atractivo ha impulsado la producción de algunas variedades de amaranto con fines ornamentales (Brenner y Makus, 1997). Finalmente, como sustrato de microorganismos, se ha encontrado que combinada con manitol, la harina de amaranto a 4 g L<sup>-1</sup> es un buen factor de crecimiento para el desarrollo de rizobios (*Sinorhizobium fredii* y *Bradyrhizobium japonicum*) (Videira *et al.*, 2002).

## **2.9. Exigencias ecológicas del cultivo de amaranto**

Históricamente, el amaranto se ha cultivado en un amplio rango ambiental, desde el trópico hasta las regiones áridas. Se desarrolla satisfactoriamente desde el nivel del mar hasta los 3,200 msnm; siendo de 2,000 a 2,600 msnm las alturas más adecuadas para su cultivo (Reyna, 1991; Rosales, 1999). Sin embargo, cada variedad tiene una respuesta diferente a las mismas condiciones agronómicas y ambientales (Pospisil *et al.*, 2006; Skwarylo-Bednarz y Krzepilko, 2008) debido a la plasticidad que permite adaptar la producción de biomasa y grano a un amplio rango de condiciones (Jacobsen y Sherwood, 2002).

Por otra parte, varios de los amarantos son sensibles a la longitud del día. Por ejemplo, variedades de *A. hypochondriacus* provenientes del sur de México no florecen en el verano de Pennsylvania, E.U.A. Sin embargo, maduran durante los días cortos en condiciones de invierno, en invernadero. Aunque el efecto de los días cortos o largos en el amaranto es mínimo, en general las variedades productoras de follaje y las derivadas de *A. hypochondriacus* presentan mayor actividad metabólica con 15 horas luz, aunque su producción no se ve significativamente afectada por la duración del día (Avasthi *et al.*, 2011). Por otra parte, las variedades procedentes

de *A. cruentus* y la mayoría de *A. caudatus* son más afines a los días cortos (El-Sharkawy *et al.*, 1968; Mujica, 1992).

Varios estudios han mostrado que las temperaturas óptimas de germinación varían entre los 16 y 35 °C, y que ésta se incrementa cuando la temperatura es más cercana al rango superior. Para el desarrollo, la temperatura adecuada se encuentra entre 16 a 24 °C, siendo la mejor la cercana a los 21 °C (Cristaudo *et al.*, 2007; Taboada y Guadarrama, 2007). Generalmente se encuentra a *A. hypochondriacus* en lugares de mayor altitud y climas templados, mientras que *A. cruentus* se encuentra más adaptada a altitudes medias y climas semitropicales. Aunque *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* toleran altas temperaturas, éstas no resisten heladas. Su desarrollo cesa a los 8 °C y las plantas son dañadas por temperaturas por debajo de 4 °C (Taboada y Guadarrama, 2007).

Para la germinación de la semilla y establecimiento de las raíces, el amaranto requiere de sustratos bien humedecidos, pero una vez que las plántulas de amaranto para grano son establecidas se desarrollan bien con limitaciones de agua; de hecho, se desarrollan mejor bajo condiciones de sequía y altas temperaturas. Por otro lado, el amaranto para consumo de hoja, requiere humedad a través de todo el ciclo de crecimiento. Éstos son rutinariamente desarrollados en áreas que reciben alrededor de 3,000 mm de precipitación anual (Taboada y Guadarrama, 2007).

El amaranto para grano ha sido desarrollado en agricultura de temporal, en áreas que reciben una precipitación anual de unos 200 mm, aunque el rango de precipitación adecuado para el cultivo se encuentra entre los 800 a 1200 mm (Reyna *et al.*, 1997; Jurado-Rentería, 1998; Taboada y Guadarrama, 2007), siendo la germinación la etapa más susceptible a la ausencia de agua (NAP, 1984; Taboada y Guadarrama, 2007); posteriormente, dependiendo de la especie,



algunas resienten más la deficiencia hídrica en la etapa vegetativa, mientras que otras lo hacen en floración (Ayodele, 2000).

Varios factores ambientales afectan adversamente el crecimiento y desarrollo de la planta, siendo el amaranto moderadamente tolerante a la salinidad y a la sequía. Sin embargo, la salinidad es uno de los más importantes factores abióticos que le causan estrés, induciendo un amplio rango de perturbaciones tanto a nivel celular como en toda la planta (Munns, 2005). En los últimos años, la sequía se ha extendido a más zonas agrícolas, siendo un problema que afecta la producción. Las respuestas de la planta a la salinidad y la sequía tienen mucho en común, dado que las altas concentraciones de sales aumentan el potencial osmótico de la solución del suelo, creando un estrés en la planta. Además del problema osmótico, la sal también impone un estrés iónico en la planta, principalmente en relación a la acumulación de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  (Munns, 2002). La planta puede desarrollarse adecuadamente a concentraciones de 0 a 2000 ppm de sales; arriba de esta cantidad, y hasta 4000 ppm, el amaranto crece pero se genera cierto daño en alguna etapa vegetativa, en tanto que a partir de 5000 ppm se inhibe totalmente el desarrollo de la planta (Macler y Macelroy, 1989).

El amaranto requiere de suelos bien drenados, aunque se puede cultivar en diferentes condiciones edáficas, desde suelos de textura arenosa hasta suelos de textura arcillosa. En el trópico, los amarantos para consumo vegetal son frecuentemente cultivados en las partes planas, donde los suelos comúnmente son ácidos (valores de pH entre 6 y 7), aunque tolera suelos con pH de 4.5. Sin embargo, las características favorables para la producción de amaranto se encuentran en suelos arenosos, con pH de 5.5 a 7.5 (Xolalpa, 1990; Martínez, 1998).

El amaranto se desarrolla bien en suelos con una amplia variación de nutrimentos y requiere de 3.0 a 4.5 t ha<sup>-1</sup> de materia orgánica (Akanbi y Togun, 2002), de 30 a 240 kg ha<sup>-1</sup> de

nitrógeno (Akanbi y Togun, 2002; Abbasi *et al.*, 2012) y de 40 a 63 kg ha<sup>-1</sup> de P (Akanbi y Togun, 2002; Parra-Cota *et al.*, 2014), así como presencia de potasio, calcio y magnesio (Scmidt, 1977), dependiendo de las condiciones ambientales y características del suelo (Akanbi y Togun, 2002; Pospisil *et al.*, 2006).

## **2.10. Prácticas agronómicas en la producción de amaranto**

### **2.10.1. Preparación de las camas de cultivo y siembra**

El amaranto es usualmente sembrado directamente en el campo. En pocas ocasiones, como en el caso de variedades con propósito de consumo vegetal, son trasplantadas en el campo; en cuyo caso se utilizan generalmente plántulas en una etapa donde alcanzan cuatro hojas verdaderas. Previo a la siembra en suelo, ya sea manualmente, con yunta o mecánicamente, se recomienda arar, rastrar, barbechar y en algunos casos nivelar el suelo. Dependiendo del tipo de suelo, puede ser necesario un segundo rastreo, para tener una cama de cultivo sin terrones y bien aireada, y que las lluvias no desalojen las pequeñas semillas o en su caso la plántula de amaranto. La semilla debe ser sembrada a una profundidad no mayor de un cm. Al ser un cultivo predominantemente de temporal, la lluvia puede favorecer la formación de costras en el suelo, que impiden la germinación de la semilla y su emergencia (Morales *et al.*, 2014), lo que hace necesario incluir alguna práctica de rompimiento de esta costra.

La fecha de siembra está delimitada por la temporada de lluvia, siendo por lo general en el centro de México entre abril y junio, mientras que en las regiones más cálidas puede sembrarse en el ciclo de primavera-verano y otoño-invierno; siempre y cuando exista humedad en el suelo para lograr la germinación (Jurado-Rentería, 1998; Tapia, 2000). En Estados Unidos, con base en investigación desarrollada por un periodo de cuatro años, se determinaron diferentes

fechas de siembra entre mayo y julio, encontrando que la fecha de siembra afecta el rendimiento de grano de amaranto; siendo a mediados de junio la mejor época de siembra e inicios de julio la peor para esa zona, aunque la fecha puede desplazarse unas semanas debido a condiciones ambientales (Henderson *et al.*, 1998).

En México, la siembra se realiza de dos formas. La primera se hace en almácigos para posteriormente ser trasplantados a las parcelas de cultivo; en general, esta práctica se realiza en las zonas agrícolas de la ciudad de México y zona Metropolitana, donde conservan el sistema de chinampa y aprovechan el lodo proveniente del fondo de los canales (Rosales, 1999; Sistema Producto Amaranto del Distrito Federal, 2006). La segunda se realiza de forma directa en lo alto del surco, utilizando de 4 a 10 kg ha<sup>-1</sup>, según las condiciones ambientales, la cual puede ser en banda o mateado (Tapia, 2000; Morales *et al.*, 2014). Después de esta etapa, las técnicas de trabajo son las mismas en las dos formas de siembra, excepto que en siembra directa, a los 20 a 35 días posteriores se hace un aclareo, que puede ir acompañado con fertilización (Trinidad *et al.*, 1990).

### **2.10.2. Densidad de siembra**

La densidad de siembra depende del método de cosecha previamente definido. Estudios preliminares sobre densidad indican que para muchos cultivares de *A. hypochondriacus* y *A. cruentus*, 320,000 plantas ha<sup>-1</sup> es una densidad aceptable, tanto para rendimiento para el manejo del cultivar (Henderson *et al.*, 2000). Al respecto, actualmente se reconoce que la densidad de siembra es un factor que influye en el desarrollo y rendimiento del amaranto, aunque existe información contradictoria. En algunas experiencias se ha encontrado que no existe respuesta en la producción de grano respecto a la densidad de siembra (Henderson *et al.*, 2000), mientras que

en otras investigaciones, al aumentar la densidad de plantas el rendimiento ha aumentado (Díaz-Ortega *et al.*, 2004) o disminuido (Gimplinger *et al.*, 2008; Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011). También, se ha planteado el uso de altas densidades de siembra como estrategia para controlar barrenadores del tallo (*Hypolixus truncatulus* y *Amauromyza abnormalis*), aunque se ha observado que esto no influye en la presencia y efecto de la plaga sobre el cultivo (Torres-Saldaña *et al.*, 2004).

En México se establece el cultivo de amaranto a densidades de entre 50 mil a 200 mil plantas ha<sup>-1</sup>, dependiendo de la región (Espitia, 1992). La densidad se ha incrementado en los últimos años debido a que a partir de 240,000 plantas ha<sup>-1</sup> se reduce la humedad en grano, favoreciendo la homogeneidad a la madurez y a la cosecha (Edwards y Volack, 1980; Haas, 1983; Gimplinger *et al.*, 2008). Para la obtención de follaje como verdura, se ha observado que a mayor densidad aumenta el contenido de P y Ca pero se reduce la cantidad de hojas (Igbokwe y Hollins, 2000); sin embargo, se plantea que con densidades de 320 mil a 360 mil plantas ha<sup>-1</sup> se compensa dicha reducción de biomasa por planta y se obtiene mayor producción total (Haas, 1983).

Desde la perspectiva ambiental, las altas densidades aumentan la infiltración hídrica, reduciendo la erosión y escurrimiento de productos químicos; adicionalmente, se incorpora materia orgánica al suelo con los residuos agrícolas (Okigbo, 1969). Lo anterior aumenta la eficiencia del uso de agua y nitrógeno (Díaz-Ortega *et al.*, 2004); no obstante, en zonas áridas y semiáridas, al no disponerse de la humedad necesaria, un aumento en la densidad de población puede afectar negativamente la producción (Henderson *et al.*, 2000). También se ha observado que cada variedad tiene una respuesta diferenciada a diversas densidades, por lo que deben considerarse varios factores para el cultivo de amaranto (Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011).

### **2.10.3. Labores de cultivo**

Durante el desarrollo del cultivo resulta importante hacer el deshierbe para que otras plantas no compitan con el amaranto por los nutrimentos, la luz y el agua. Una primera labor de deshierbe se realiza entre los 20 y 30 días después de la siembra, o cuando la planta tenga más de 10 cm de altura. Una segunda labor, se realiza cuando las plantas tienen de 30 a 40 días. Conjuntamente con esta última actividad, se realiza un aporque para facilitar el crecimiento radical y nutrición del cultivo (Trinidad *et al.*, 1990).

En la segunda labor, según las condiciones del cultivo, se puede aplicar abono orgánico o fertilizante químico, considerando como un criterio importante de definición si se aplicó o no fertilizante al momento de la siembra. Además, durante el desarrollo del cultivo podrá aplicarse el fertilizante mineral, para hacer más eficientes ambas fuentes de nutrimentos. En la agricultura moderna se puede aplicar fertilizante químico en el agua de riego durante el ciclo del cultivo, aunque en amaranto actualmente no es una práctica común (Morales *et al.*, 2014).

### **2.10.4. Fertilización**

La adecuada fertilización de los cultivos está orientada en general a responder una pregunta básica de los agricultores: ¿Qué dosis de nutrimentos se debe aplicar al cultivo para maximizar la productividad con el mínimo costo económico y ambiental? Ello implica el diseño de una dosis que considere la máxima productividad para el cultivo, sin provocar excesos de fertilización que produzcan la contaminación del medio ambiente.

Para ello, en las últimas décadas se ha propuesto un método de fertilización de los cultivos ampliamente difundido en el país. Este método de fertilización consiste en tres componentes principales, que considera las interacciones del sistema suelo-cultivo-clima-

fertilizante: 1) la demanda de nutrimentos del cultivo (Demanda); 2) el suministro del suelo que pueden absorber los cultivos (Suministro); y 3) la eficiencia de recuperación de los fertilizantes aplicados (Eficiencia de la Fertilización). Cuantificando adecuadamente estos parámetros es posible llegar a una dosis de fertilización para el cultivo de amaranto en los agroecosistemas existentes. Para cuantificarlos se requiere de realizar ensayos de fertilidad en las distintas variedades de cultivo y en los distintos suelos, bajo diferentes condiciones de manejo.

La metodología anteriormente expuesta no ha sido utilizada para una recomendación de dosificación de fertilizantes para el amaranto. Actualmente, la práctica general de fertilización en producción consiste en aplicar al momento de la siembra estiércol o una parte de fertilizante nitrogenado con el total de fósforo y a la primera escarda se administra el nitrógeno restante (Escalante, 2011; Ayala *et al.*, 2012; Parra y Delano *et al.*, 2012).

Con base en la fenología del cultivo, la práctica anterior se considera inadecuada, debido a que con ésta la planta no dispone del nitrógeno necesario en la etapa de más demanda, que coincide con el momento de mayor crecimiento (Escalante, 2011). No obstante que la fertilización es una de las prácticas con mayor influencia sobre el desempeño del cultivo, debido a que el rendimiento y la composición en el amaranto dependen en buena medida de los compuestos presentes en el suelo (Demmler, 1998; Kołodziej, 2006), actualmente no se conoce con precisión la dosis óptima para su adecuado desarrollo. En general, la aplicación de nitrógeno (N) y fósforo (P) producen una respuesta favorable, al aumentar el rendimiento de grano, el número de semillas por planta, la proteína foliar y de grano, así como la biomasa; aunque el aumento de ésta última no siempre influye en el rendimiento de semilla (Espitia, 1992; Elbehri *et al.*, 1993; Myers, 1998; Pospisil *et al.*, 2006; Thanapornpoonpong *et al.*, 2008; Abbasi *et al.*, 2012). Sin embargo, los resultados actuales son inconsistentes y algunos incluso contradictorios

respecto a la dosificación; además, hay poca información respecto al efecto de otros nutrientes (Miguel-Chavéz *et al.*, 1999; Díaz-Ortega *et al.*, 2004).

El N es el nutriente más estudiado, debido a que es el más limitante en el desarrollo del cultivo de amaranto (Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011). En condiciones de temporal, con la aplicación de 80 kg N ha<sup>-1</sup> se han obtenido rendimientos de grano entre 1,600 a 3,275 kg ha<sup>-1</sup> (Espitia, 1992). En la misma zona, duplicando la dosis de N se han tenido rendimientos de 1868 kg ha<sup>-1</sup> (Arellano y Galicia, 2007). En otras condiciones, con 60 kg ha<sup>-1</sup> no hubieron diferencias respecto a aplicaciones de 0 y 30 kg de N ha<sup>-1</sup>; sólo al aplicar 80 kg de N ha<sup>-1</sup> hubo un incremento ( $p \leq 0.05$ ) de 12.42% (Akanbi y Togun, 2002; Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011). En tanto que con *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*, con dosis de 0, 50 y 100 kg ha<sup>-1</sup> durante tres años, la aplicación de nitrógeno no afectó la producción de materia seca ni el contenido de proteína cruda, mientras que el rendimiento de grano y el peso de mil semillas en comparación con el testigo sólo aumentó en el segundo año. La variación en los efectos del N se explica por las condiciones ambientales, enfatizando el cambio de precipitación, debido a que en el primer y tercer año las precipitaciones registraron 500 mm y el segundo año la precipitación fue de 275 mm. Por lo tanto, el efecto del nitrógeno en el año con menor precipitación se adjudica a la disminución en la lixiviación del nutriente y a las bajas tasas de mineralización, por lo que para tener resultados consistentes es necesario tomar en cuenta los factores ambientales (Pospisil *et al.*, 2006).

Generalmente, la deficiencia de P en las plantas genera un desarrollo inapropiado (Mamata *et al.*, 2004), los resultados en amaranto indican que la aplicación de P mejora la producción. En algunos casos, con dosis de 0 a 90 kg ha<sup>-1</sup> de P se observó una relación directamente proporcional entre el aumento de fertilización con la producción de grano y

biomasa, determinando una dosis óptima de 50 kg ha<sup>-1</sup> de P para la zona donde se realizó el estudio (Ojo *et al.*, 2007). Otros investigadores no encontraron una respuesta consistente entre el aumento de la cantidad de P y la producción (Gupta y Thimba, 1992), ya que con 30 y 60 kg ha<sup>-1</sup> se obtiene la misma producción o inclusive disminuye con la dosis más alta (Ramírez-Vázquez *et al.*, 2011).

En comparación con N y P, existen menos trabajos que evalúen el efecto de potasio (K) (Miguel-Chávez *et al.*, 1999). La insuficiencia de K causa poca resistencia al frío y sequía (Oya *et al.*, 1977), por lo que algunos estudios han evaluado el efecto del nutrimento sobre la conductancia estomática y el contenido de clorofila en variedades de amaranto, encontrando que con siete niveles de K (0 a 6 meq l<sup>-1</sup>) algunas variedades no responden al incremento y las que lo hacen, responden hasta la máxima concentración, infiriendo que entre variedades existe diferente dependencia y sensibilidad al K (Miguel-Chávez *et al.*, 1999). Así mismo, se han estudiado desechos agrícolas en diferentes cantidades (0 a 30 t ha<sup>-1</sup>) como fuente de K para amaranto, encontrando que existe respuesta al incremento de fuentes de K, que genera una dosis óptima entre 10 y 15 t ha<sup>-1</sup> de desechos de cacao, plátano o lirio acuático (*Eichhornia crassipes* Mart. Solms) (Adebooye *et al.*, 2001).

También se ha evaluado la interacción entre macronutrientes, encontrando que a mayor aplicación de N existe mayor absorción de P y K en la biomasa de amaranto (Akanbi y Togun, 2002), pero en la etapa de formación de grano el segundo nutrimento ya no responde a la dosis de N (Abbasi *et al.*, 2012). Así mismo, se comparó la fertilización de N contra N:P:K a razón de 1:1:1, encontrando que ésta última genera mayor producción e incrementa el contenido de P en hoja, pero no el de K. Además, se establece que dependiendo de la producción de biomasa se dan los requerimientos nutrimentales, encontrando una dosis óptima de 20 NPK g m<sup>2</sup> para la



variedad con menor producción y 40 g NPK m<sup>2</sup> para la variedad con mayor biomasa (Ohshiro *et al.*, 2016).

La aplicación de 3.0 y 4.5 t ha<sup>-1</sup> de composta de rastrojo de maíz con gallinaza que contenía 2.41, 1.40 y 2.09 % de N, P y K respectivamente, generó la máxima producción de amaranto (Akanbi y Togun, 2002). Sin importar la naturaleza del fertilizante, se sabe que éste repercute en la producción. En condiciones tropicales, se comparó la fertilización química respecto a la orgánica (estiércol), encontrando que la primera genera mayores utilidades económicas respecto a la segunda (Akinola y Eresama, 2009).

En amaranto, otro enfoque de la fertilización se ha dirigido a observar el efecto de los macronutrientes sobre la concentración de antioxidantes en las hojas, encontrando que existe respuesta favorable a las dosis, pero que ésta es diferente entre variedades, ya que la variedad Rawa alcanzó el mayor contenido de antioxidantes con la fertilización N-P-K 130-70-70 kg ha<sup>-1</sup> y la Azteca con 50-40-40 kg ha<sup>-1</sup>, por lo que se debe definir una fertilización específica (Skwarylo-Bednarz y Krzepilko, 2008). Así mismo, en sistemas hidropónicos, se ha estudiado la interacción entre nutrientes para tratar de modificar la concentración de minerales y vitaminas en hoja de amaranto, encontrando que al aumentar en la concentración de calcio, magnesio y zinc en la solución nutritiva se incrementó la concentración del último en tejido vegetal; mientras que al acrecentar la concentración de magnesio y hierro hubo mayor contenido del segundo así como de carotenoides, concluyendo que no pueden aumentarse de forma simultánea los nutrientes en la planta y que éstas modificaciones no repercuten en la producción de biomasa (Croft *et al.*, 2017).

### **2.10.5. Riego**

En México, el amaranto se cultiva comercialmente en condiciones de temporal, siendo la superficie sembrada con riego sólo de 2 a 4% del total, localizado principalmente en zonas del norte del país (SIAP, 2016). Independientemente del sistema de producción, el cultivo requiere una adecuada cantidad de agua para que se desarrolle en una óptima tasa de crecimiento. Los requerimientos varían con el genotipo y las condiciones ambientales. El agua utilizada por los cultivos es normalmente relacionada con el total de la producción de materia seca o el rendimiento económico. Esto conduce al concepto del uso eficiente del agua, ampliamente definido como el rendimiento de un cultivo por unidad de agua utilizada (Steduto *et al.*, 2007).

El uso eficiente del agua es un factor útil para determinar el requerimiento de agua por cultivo específico en sus diferentes etapas de crecimiento. El clima de una región influye sobre la eficiencia del agua, lo que se relaciona con la transpiración del cultivo, particularmente vía déficit de presión de vapor (Tsakiris, 1982; Steduto *et al.*, 2007).

En África se han explorado métodos para hacer un uso eficiente del agua en la producción de amaranto a través de diversas técnicas. En sistemas hidropónicos, se evaluó la viabilidad para producir amaranto como verdura con alto contenido de hierro, zinc y carotenos, encontrando que técnicamente éste sistema es viable; sin embargo, comparado con la producción en suelo, no es viable económicamente (Croft *et al.*, 2017). Además, se valoró el riego por surco, por inundación, por aspersión y por goteo, encontrando que todos tienen rentabilidad económica, pero los dos últimos tienen los mayores rendimientos y de éstos el riego por goteo presenta la mayor eficiencia en el uso de agua (Okunade *et al.*, 2009).

El amaranto, por ser una planta C<sub>4</sub>, presenta tolerancia al déficit de agua (Lal y Edwards, 1996). Esto lo logra mediante mecanismos como la capacidad de ajuste osmótico (1.08-1.24 MPa), reducción del crecimiento foliar y conductancia estomática (Liu y Stützel, 2002 a, b). Sin embargo, el estrés hídrico durante cierto periodo disminuye la producción de materia fresca y seca (Ejjeji y Adeniran, 2010), altera la proporción de biomasa, decreciendo la parte aérea y aumentando la radical (Liu y Stützel, 2004). Además promueve la acumulación de sustancias antinutricionales como oxalatos y taninos que disminuyen la calidad nutricional del amaranto (Becerra, 2000; Paredes-López *et al.*, 2006).

A pesar de que el agua tiene impacto importante en la producción del amaranto (Ejjeji y Adeniran, 2010), existe poca información respecto a su demanda hídrica (Díaz-Ortega *et al.*, 2004), limitándose la mayoría de las recomendaciones a mencionar las precipitaciones adecuadas (800 a 1200 mm) para el desarrollo y la producción (Taboada y Guadarrama, 2007).

Con excepción de las zonas áridas, se conoce que la eficiencia en el uso del agua aumenta conforme se incrementa la densidad de plantas por m<sup>2</sup> y la dosis de nitrógeno (Díaz-Ortega *et al.*, 2004). Además la restricción de agua, comparada con la de macronutrientes, tiene un efecto más enfático sobre la producción de materia fresca y seca total (Ejjeji y Adeniran, 2010). Desafortunadamente, a diferencia de otros cultivos, en el caso del amaranto no existe información de mayor precisión sobre la relación entre el agua y la producción, la cual es compleja de establecer debido a la intervención de varios factores como el suelo, clima, variedad y etapa fenológica (Ejjeji y Adeniran, 2010). Por ejemplo, en *A. hypochondriacus* se ha reportado que en etapa vegetativa la restricción de agua tiene mayor impacto negativo, mientras que para *A. cruentus* ocurre en floración y en ambas especies al momento de llenado del grano tiene menor efecto sobre el rendimiento del mismo (Ayodele, 2000). Por lo que la determinación

de la producción en función del agua generalmente es válida para condiciones cercanas o similares a donde se realiza la estimación (Tsakiris, 1982).

Información concerniente al uso eficiente del agua puede facilitar el ahorro del vital líquido en las prácticas de irrigación, mejorar el manejo del cultivo y en consecuencia incrementar la producción. Por lo tanto se requieren datos experimentales de diferentes ubicaciones y especies para formular modelos adecuados (Ayodele, 2000).

#### **2.10.6. Cosecha**

El momento de la cosecha depende del clima, altitud y fecha de siembra, entre otros factores. La cosecha de grano se realiza cuando la planta llega a la madurez fisiológica, que ocurre cuando ésta empieza a secarse o ponerse amarillenta, la panoja cambia de color (las panojas rojas a café y las panojas verdes a amarillas) y la semilla al morderla se siente ligeramente dura. La dehiscencia en esta etapa es una característica que genera mermas en los rendimientos, dado que al sacudir la planta y al mover la espiga algunas semillas caen al suelo (Granados y López, 1990).

En bajas densidades de siembra el corte se realiza de forma manual, mientras que en altas densidades puede realizarse mecánicamente (Haas, 1983). Para esto, se han realizado adaptaciones de cosechadoras comerciales para utilizarlas en el amaranto; sin embargo, se ha observado pérdida y daño en el grano. Para reducir tales pérdidas se han realizado ajustes en los parámetros de trilla como la holgura cóncava y en la velocidad del cilindro (Majewski *et al.*, 1994), siendo las más adecuadas para minimizar el deterioro entre 8.1 a 12.8 m s<sup>-1</sup> (Krishnan *et al.*, 1994). Después de cortadas, las plantas se apilan en un lugar fresco y seco en forma de gavillas, para reducir la humedad hasta un 14 a 16%. Teniendo la humedad adecuada, se procede

a la trilla. Posteriormente, mediante venteo se limpia el grano de impurezas como inflorescencias, hojas y tallos. Para almacenar el grano de forma segura, es necesario secarlo para que tenga entre 10 a 14% de humedad, lo cual por lo general se realiza exponiéndolo al sol por tres días, así se puede guardar por tiempo prolongado sin que exista riesgo de que se generen hongos productores de toxinas como *Aspergillus flavus*, *A. parasiticus* y *Fusarium* spp. (Trinidad *et al.*, 1990; Bresler *et al.*, 1998).

En cuanto al amaranto para forraje, se ha determinado que entre el inicio de la floración y la formación de grano se incrementa la producción de materia seca pero decrece el contenido de P, K, proteína cruda y verdadera, así como factores antinutricionales como oxalatos y nitratos, por lo que se considera que durante la segunda etapa es un mejor momento para cosechar la planta (Abbasi *et al.*, 2012). Como cultivo de doble propósito, las principales especies de amaranto son viables para tal fin (Van den Heever y Venter, 2007), aunque *A. cruentus*, en comparación con *A. hypochondriacus*, presenta mejor respuesta productiva cuando es sometida a defoliación (Martínez-Moreno *et al.*, 1999). El máximo rendimiento de hoja y grano se obtiene al realizar podas cada quince días durante la etapa vegetativa, cuando la planta mide 20 cm (Materechera y Mukwevho, 2007), sin sobrepasar el 10% de la materia aérea (Martínez-Moreno *et al.*, 1999). En la planta de amaranto la fase de floración puede retrasarse podándola entre los 10 y 15 cm de altura, aunque ésta práctica conduce a una reducción en el rendimiento de grano (Mnzava y Masam, 1985).

### **2.11. Plagas y enfermedades**

Comparado con otros cultivos, el amaranto presenta cierta tolerancia a plagas y enfermedades (Andrasofszky *et al.*, 1998). No obstante, actualmente al incrementarse las áreas

de producción, también se ha observado mayor presencia de organismos nocivos que disminuyen el rendimiento y la calidad del grano.

En el cultivo de amaranto son pocas las especies de insectos que constituyen plagas de importancia económica bajo diferentes condiciones agroecológicas. Sin embargo, se han presentado plagas ocasionales que pueden provocar la pérdida completa del cultivo si no se efectúa un control rápido y adecuado. El orden de importancia de los insectos que causan daños al cultivo de amaranto puede variar en función a la zona de producción o de un ciclo a otro. Las plagas de mayor relevancia económica son: Diabrotica (*Diabrotica* sp), gusano soldado (*Spodoptera exigua*) y gusano de la panoja (*Spoladea recurvalis*) (Espitia, 1991; Monteros *et al.*, 1994).

También, la producción de grano se ha reducido debido al daño en tallo causado por *Amauromiza abnormalis* y *Hypolixus truncatulus*, presentando el segundo la mayor infestación durante el periodo de más calor (Phogat *et al.*, 1994; Torres-Saldaña *et al.*, 2004). Además, se reporta la presencia de gusano cortador (*Agrotis* spp y *Feltia* spp), pulgas (*Epitrix* spp y *Myzus* spp), chinche (*Lygus* spp) (Espitia, 1991; Monteros *et al.*, 1994), así como *Tetranychus urticae* Koch y *T. ludeni* Zacher en *A. cruentus*, aunque comparado con tomate (*Solanum macrocarpon* L.), la presencia de éstos ácaros fitófagos en amaranto es baja (Adango *et al.*, 2007).

El amaranto cultivado en pequeñas extensiones o mezclado con varios ecotipos, reduce la incidencia de problemas fitosanitarios. Sin embargo, en los campos de cultivo comercial se observa una creciente incidencia de enfermedades, siendo las principales: Mancha foliar o mal negro (*Alternaria* sp), Mancha Negra del tallo (*Macrophoma* sp.), Polvillo blanco o roya blanca (*Albugo* sp.), Musuru (*Sclerotinia* sp), Damping off (*Phythium* sp, *Fusarium* sp y *Rhizoctonia* sp,) y Micoplasma (Teri y Mlasani, 1994), además de la presencia de virus del mosaico, con una

incidencia del 10 al 19.7% (Taiwo y Owolabi, 2004; Raj *et al.*, 2010), afectando el rendimiento del cultivo (Agrios, 1997) debido a que modifica vascularmente el vástago, generándole hiperplasia; además, metabólicamente reduce el contenido de glucosa y sacarosa debido a la baja translocación de fotosintatos (Srivastava *et al.*, 2012).

También se reportan infecciones por *Phytoplasma aurantifolia*, el cual está asociado a varias enfermedades y es propagado mediante insectos entre plantas como la soya y cactáceas, entre otras (Ochoa-Sánchez *et al.*, 2009). En cuanto a hongos, hay los que generalmente dañan las hojas como: *Choanephora cucurbitarum*, *Alternaria amaranthi*, *Phytophthora* spp, *Rhizoctonia* spp, y *Sclerotinia sclerotiorum* (Teri y Mlasani, 1994); así como los que tienen afinidad por el tallo como: *Pythium aphanidermatum* y *Macrophomina phaseolina* (Mihail y Champaco, 1993). Además, se conoce de la presencia de nemátodos (*Meloidogyne incognita* y *M. arenaria*) en la raíz de *A. cruentus*, aunque se ha observado que se mantienen en bajas poblaciones (Rodríguez-Kabana *et al.*, 1988).

Una recomendación práctica para evitar enfermedades es la rotación de cultivos. Otras consisten en el control de insectos y enfermedades para lograr cultivos sanos, incluyendo la eliminación de plantas hospederas (Ochoa-Sánchez *et al.*, 2009), no sembrar amaranto en el mismo terreno durante varios ciclos, rotar con leguminosas, eliminar residuos de cosechas anteriores, evitar periodos prolongados de sequía y, si es posible, suplir con riego, utilizar trampas amarillas y, de ser necesario el uso de productos químicos, éstos deben ser de etiqueta verde y biodegradables. Por lo anterior, es importante que los productores de amaranto puedan identificar y prevenir los daños que ocasionan las principales plagas y enfermedades en el cultivo, realizando un monitoreo constante (Carrero, 1996).

## 2.12. Análisis de crecimiento vegetal

El crecimiento vegetal es la transformación en tamaño y forma de la planta, resultado de la interacción de procesos internos y factores externos; siendo los primeros: la fotosíntesis, la respiración, división celular, elongación y diferenciación; los segundos: temperatura, intensidad de luz, densidad de población, calidad de semilla, así como disponibilidad de agua y nutrimentos. Dependiendo de los objetivos, la evaluación del crecimiento puede realizarse al final del ciclo o en diferentes etapas del cultivo (Hunt, 1978; Taiz y Zeiger, 2006).

Las dos metodologías para el análisis de crecimiento son: a) la clásica, la cual implica muchas muestras en función de un tiempo amplio (cada 2 semanas), para generar funciones paramétricas flexibles y curvas de crecimiento que explican el desarrollo de la planta (Gardner *et al.*, 1985) la funcional o dinámica, haciendo medidas más frecuentes y con un número pequeño de plantas. Con éste segundo método se puede analizar el crecimiento con base en la materia seca y el área foliar en función del tiempo y mediante regresiones (Radford, 1967; Flórez *et al.*, 2006).

Desde el punto de vista agronómico, lo más apropiado para analizar el crecimiento de una planta es mediante datos directos, cuantitativos, simples y básicos como materia seca, área foliar, altura, diámetro de tallo y tiempo. Con éstas medidas elementales se obtienen datos como la tasa relativa de crecimiento (TRC) y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Además se puede calcular el tamaño de la principal fuente fotosintética mediante la duración del área foliar (DAF), razón del área foliar (RAF), razón de peso foliar (RPF), área específica foliar (AEF) y el índice del área foliar (IAF), así como valorar la actividad de la fuente fotosintética mediante la tasa de asimilación neta (TAN) (Radford, 1967; Hunt, 1978).



Con los datos obtenidos se puede establecer el patrón de crecimiento de la planta, que se describe mediante la curva sigmoidea, en la que se observan las fases logarítmica, lineal y de senescencia. Además, en ésta se pueden marcar las etapas fenológicas de la planta. Así mismo, se puede realizar análisis mediante el método de regresión, el cual será válido dentro del intervalo de datos que se tenga (Radford, 1967; Escalante-Estrada y Kohashi-Shibata, 2015).

Con la información obtenida se puede determinar la viabilidad de una especie en diferentes hábitats, la compatibilidad entre especies, las diferencias genéticas en la capacidad productiva; así como conocer el efecto de tratamientos agrícolas sobre el crecimiento y la producción de los cultivos (Escalante-Estrada y Kohashi-Shibata, 2015).

### **2.13. Conclusión**

A lo largo de la historia de la humanidad, en varias culturas el amaranto ha sido una alternativa de alimentación, debido a su adaptación a diversas condiciones ambientales y por su amplio aprovechamiento, pudiendo consumirse follaje y grano. Además, en las últimas décadas estas características se han fortalecido por el descubrimiento de sus beneficios nutrimentales y la utilidad de la planta en áreas productivas como la farmacéutica, pecuaria e industrial, entre otras. En México, tradicionalmente la producción se ha mantenido en el centro del país, habiendo poca expansión del cultivo hacia otras zonas.

Considerando el actual escenario de cambio climático, el amaranto, aunado a otras estrategias, puede contribuir a diversificar la producción, pero para lograrlo es necesario conocer la fenología de las variedades, así como el manejo adecuado de los factores que tienen mayor incidencia, como el agua, nutrición y densidad de siembra, para así poder obtener los máximos rendimientos posibles de forma sustentable.

Debido a la interacción entre factores que dan resultados diversos, se requieren datos experimentales de diferentes ubicaciones y especies para formular modelos adecuados, los cuales serán válidos para condiciones similares o cercanas a donde se realiza la estimación. Para eso, es conveniente tener una visión integral que considere la máxima producción de biomasa de cada variedad sembrada a cierta densidad; así mismo, tomar en cuenta las circunstancias ambientales, para poder aportar los nutrimentos necesarios a la planta manteniendo la viabilidad del suelo.

La disponibilidad de agua es una situación apremiante, que se agudizará en el futuro. Si bien la restricción del vital líquido puede ser tolerada por este cultivo, su limitación es uno de los factores más estresantes que alteran negativamente la producción, impidiendo su expansión hacia otras regiones, como las áridas. Al igual que con la nutrición, para aportar la humedad adecuada se debe partir de las características particulares de la variedad y su entorno. Conociendo las necesidades del cultivo es importante darle los recursos de forma eficiente, siendo el riego por goteo la técnica que cumple con ésta característica, pudiendo complementarse con la adición de nutrimentos mediante la técnica de fertirrigación.

# CAPÍTULO III. DINÁMICA DE CRECIMIENTO, ACUMULACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE MATERIA SECA Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DEL AMARANTO EN EL ALTIPLANO OESTE DE SAN LUIS POTOSÍ

## 3.1. Introducción

El amaranto es un cultivo de manejo intensivo del cual hay poca información local sobre análisis del crecimiento y fenología de la planta. El crecimiento se define como un incremento irreversible en el tamaño de las plantas, que está acompañado de dos procesos: morfogénesis y diferenciación (Hunt, 1978; Radosevich y Holt, 1984; Gardner *et al.*, 1985). Ambos procesos se pueden medir mediante la tasa absoluta de crecimiento, en función de la cantidad de materia seca en crecimiento presente y la tasa de funcionamiento de esta (Goudriaan y Van Laar, 1995), en relación con la influencia del ambiente (Milthorpe y Moorby, 1982).

La materia seca es el criterio más apropiado para medir el crecimiento y la magnitud del sistema de asimilación de la planta, referido frecuentemente al área foliar total (Radford, 1967; Taiz y Zeiger, 2006). La tasa de acumulación de materia seca varía a través del ciclo de vida del cultivo, por lo que la materia seca y área foliar son muestreadas a intervalos de días o semanas para cuantificar efectos de la influencia ambiental, así como para analizar diferencias genotípicas entre variedades. El área foliar es la medida usual del tejido fotosintetizador de las plantas, y es importante porque ésta determina la cantidad de energía solar que puede ser absorbida y convertida a materiales orgánicos (Shibles, 1987).

El análisis matemático de crecimiento es una aproximación cuantitativa que usa datos simples y básicos para entender el crecimiento de una planta bajo condiciones ambientales naturales o controladas. Utiliza medidas directas tales como materia seca total de la planta, área foliar total y tiempo. Este tipo de estudios permite cuantificar diferentes aspectos del cultivo,

como la duración del ciclo, la definición de las etapas de desarrollo y la distribución de los fotoasimilados por órganos. Además, los análisis del crecimiento son básicos para comprender mejor los procesos fisiológicos que determinan la producción vegetal, mediante la cuantificación de la relación existente entre el crecimiento de una planta, la producción de materia seca y la expansión de área foliar, entre estos factores, y una condición ambiental como la luz, el agua o los nutrientes (Clavijo, 1989) y así fundamentar racionalmente las prácticas de manejo del cultivo: nutrición, riego y estrategias de protección, entre otras (Barrientos, 1988).

En la planta de amaranto, se espera que se diferencien tres etapas en la curva de crecimiento sigmoideal: 1) Una fase inicial de retardación que ocurre cuando las plantas comienzan a perder masa seca durante el proceso de germinación. A medida que el embrión se desarrolla se van agotando las reservas de la semilla; 2) Una fase vegetativa o logarítmica donde el crecimiento es rápido (de forma lineal) y el poder de asimilación de la planta aumenta a medida que sus órganos se desarrollan; y 3) Una fase de envejecimiento, donde después del inicio de la fructificación ocurre una disminución del crecimiento disminuyendo por ende la masa seca (Steward, 1969).

En zonas áridas y semiáridas de México, el principal factor limitante para el cultivo de amaranto es la baja e irregular precipitación, por lo cual es necesario el desarrollo de tecnologías productivas que contemplen este factor limitante, como es la microirrigación. Investigaciones que analizan el rendimiento y sus componentes son escasas, por lo que existen interrogantes sobre las mejores prácticas agronómicas que permitan maximizar la producción. El rendimiento de grano de amaranto responde diferencialmente a las mismas prácticas agronómicas en distintos ambientes. Por lo tanto, es muy importante definir prácticas agronómicas óptimas con base en tasas de crecimiento del cultivo, determinadas en diferentes fases de crecimiento.

El objetivo de este estudio fue caracterizar la dinámica de crecimiento, acumulación y distribución de materia seca y eficiencia fisiológica de dos variedades de amaranto: *Amaranthus hypochondriacus* raza Mercado variedad Frondosa y *Amaranthus cruentus* raza Mexicana variedad Dorada), cultivadas en una región semiárida, bajo micro-irrigación, que permita determinar los indicadores fisiológicos y morfológicos que están relacionados con el rendimiento potencial en grano y forraje fresco.

### **3.2. Materiales y métodos**

La investigación fue conducida durante 2015, en el periodo otoño-invierno, en la comunidad de La Palma Pegada, municipio de Salinas, San Luis Potosí, localizado en las coordenadas 22°43'08.0"N 101°48'19.1"W, a 2,070 msnm. Físicamente, el suelo tuvo un contenido de arena (74%), limo (24%) y arcilla (6%) correspondiente a una clasificación textural arenoso-franco. Su pH fue ligeramente alcalino (7.52), con una baja conductividad eléctrica (0.119 dS m<sup>-1</sup>), un contenido medio de materia orgánica (2.4%), bajo contenido de nitrógeno (0.12%), alto de fósforo (98.8 ppm) y bajo en potasio (46.8 ppm) (Moreno, 1978). Se evaluaron las variedades de amaranto Frondosa (*Amaranthus hypochondriacus*), derivada de la raza Mercado (Torres *et al.*, 2006) y Dorada (*Amaranthus cruentus*), derivada de la raza Mexicana (Maldonado, 2014). Las variedades fueron sembradas bajo un diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos al azar, con seis repeticiones. Previo a la siembra, se realizó una fertilización de fondo, que consistió en mezclar 9.6 t ha<sup>-1</sup> de estiércol de borrego con la fórmula de fertilización mineral (60N-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-60-K<sub>2</sub>O). La siembra se hizo el 21 de agosto del 2015 en camas de cultivo de 0.8 m de ancho por 7 m de longitud, donde se establecieron dos hileras de plantas distantes 20 cm entre sí, con una separación entre plantas de 10 cm dentro de cada hilera. La densidad de población total fue de 25 plantas m<sup>-2</sup> (Díaz-Ortega *et al.*, 2004; Gimplinger *et al.*,

2008). Cada parcela experimental tuvo una superficie de  $5.6 \text{ m}^2$  ( $7.0 \times 0.8 \text{ m}$ ). Durante el crecimiento del cultivo se aplicó la fórmula de fertilización ( $64\text{N}-37\text{P}_2\text{O}_5-71\text{-K}_2\text{O}$ ) en un volumen total de agua de  $3214 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Reyna *et al.*, 1997; Jurado-Rentería, 1998; Taboada y Guadarrama, 2007). En la solución nutritiva aplicada se mantuvo un valor de conductividad eléctrica de  $2.55 \text{ dS m}^{-1}$  y un pH de 6.1. La cantidad total de fertilizante mineral aplicado fue N: 124,  $\text{P}_2\text{O}_5$ : 97 y  $\text{K}_2\text{O}$ :131  $\text{kg ha}^{-1}$  (Akanbi y Togun, 2002; Ojo *et al.*, 2007; Abbasi *et al.*, 2012; Parra-Cota *et al.*, 2014). La emergencia ocurrió a los 10 días después de la siembra (DDS). Para conocer el crecimiento y fenología del cultivo se realizaron cinco muestreos destructivos a los 33, 47, 61, 76, 96 y 103 días después de establecida la plantación (DDP) efectuándose los primeros cuatro dentro de la etapa vegetativa, floración y formación de grano; mientras que los dos últimos muestreos corresponden a la cosecha de Frondosa y Dorada, respectivamente, realizada a la madurez fisiológica. Tres plantas fueron colectadas por repetición, en las que se midieron las siguientes variables: altura de planta, número de hojas, longitud de panoja, diámetro de tallo, peso fresco y seco en sus diferentes estructuras (raíz, hoja, tallo, panoja y grano), según la etapa fenológica (Reinaudi *et al.*, 2011).

Con el fin de aportar un mayor conocimiento sobre esta especie de interés económico en el país, a partir de las medidas directas, materia seca y área foliar, se calcularon algunos índices morfológicos y fisiológicos (Cuadro 8) mediante el empleo del método clásico, basado en las fórmulas para valores promedios propuestos por Watson (1952), Yoshida (1972) y Hunt (1990).

**Cuadro 8.** Índices de crecimiento empleados en fisiología vegetal y de cultivos, adaptado de Hunt, 1978 y Gardner *et al.*, 1985.

Índice de Crecimiento	Símbolo	Valor instantáneo	Valor promedio de un intervalo de tiempo (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )	Unidades
Tasa de crecimiento relativo	TCR	$\frac{1}{W} \frac{dw}{dt}$	$TCR = \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)}{T_2 - T_1}$	g/(g día)
Tasa de asimilación neta	TAN	$\frac{1}{AF} \frac{dw}{dt}$	$TAN = \frac{\frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}}{\frac{(\ln AF_2 - \ln AF_1)}{(AF_2 - AF_1)}}$	g/(cm <sup>2</sup> día)
Tasa de crecimiento del cultivo	TCC	$\frac{1}{As} \frac{dw}{dt}$	$TCC = \frac{1}{As} \times \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}$	g/(cm <sup>2</sup> día)
Área foliar específica	AFE	$\frac{AF}{MF}$	$AFE = \frac{AF_2 + AF_1}{\frac{W_2 + W_1}{2}}$	cm <sup>2</sup> /g
Duración de área foliar	DAF	-	$DAF = \frac{(AF_2 + AF_1) \times (T_2 - T_1)}{2}$	cm/día
Índice de área foliar	IAF	$\frac{AF}{As}$	$IAF = \frac{\frac{(AF_2 + AF_1)}{2}}{\frac{1}{As}}$	Dimensional según las unidades
Razón de área foliar	RAF	-	$RAF = \frac{AF_1}{PS1} + \frac{AF_2}{PS2}$	cm <sup>2</sup> /g

Finalmente, las dos variedades fueron contrastadas por algunas características a la madurez fisiológica (MF), tales como el rendimiento de follaje y panoja en fresco y grano en seco. Para ello, se seleccionaron plantas de hileras centrales (3.2 m<sup>2</sup>) de la parcela experimental. A la cosecha, también se determinó el índice de cosecha (IC= Rendimiento de semilla/Biomasa total)\*100) (Reinaudi *et al.*, 2011), y el peso del grano. La respuesta de las dos variedades en su productividad fue soportada estadísticamente mediante un análisis de varianza (Di Rienzo *et al.*,

2016) de cada una de las variables medidas. Posteriormente se realizaron pruebas de medias mediante el procedimiento Tukey. Asimismo, se elaboraron curvas de crecimiento mediante el programa de Excel (Microsoft Office) y Curve Expert 1.4 (Hyams, 2009).

### **3.3. Resultados y discusión**

El crecimiento vegetal es extremadamente sensible a la temperatura. Cada especie o variedad posee en cualquier etapa fenológica de su vida y en diferentes condiciones una temperatura mínima debajo de la cual no crece, una temperatura óptima en la que crece a una tasa máxima y una temperatura máxima a la cual no crece (Salisbury y Ross, 1994). En el Cuadro 9 se presenta la distribución de la precipitación y el comportamiento de la temperatura máxima y mínima promedio de 12 años (2000-2011) comparado con lo ocurrido durante el periodo en que se desarrolló el experimento (2015). La precipitación presentó diferencias entre los años (2000-2011 vs 2015), siendo las más marcadas al inicio (agosto) y al final (diciembre) del cultivo. Sin embargo, en la precipitación promedio total entre el periodo 2000-2011 y año el 2015 no hubo una diferencia tan marcada, ya que se obtuvieron valores de 183.9 y 168.1 mm, respectivamente (Cuadro 9).

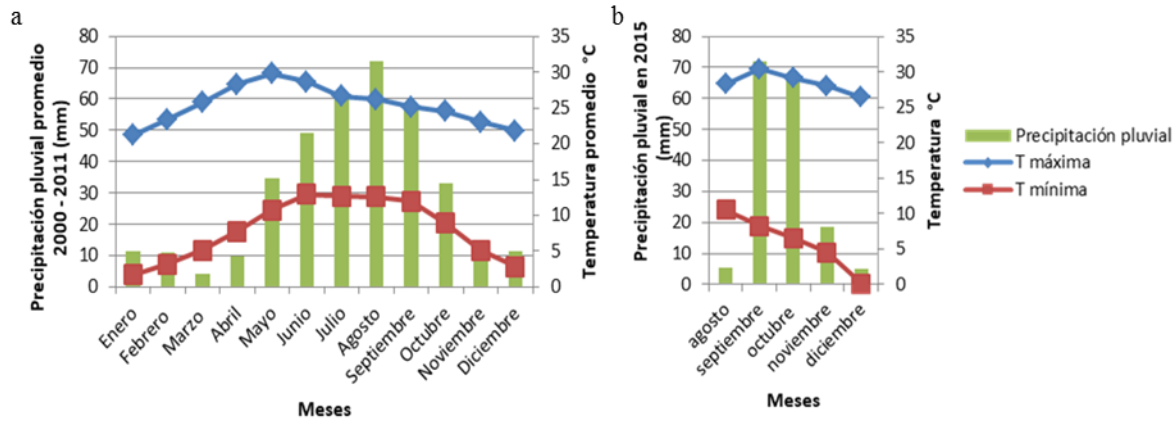


**Cuadro 9.** Distribución de la precipitación y el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas promedio de 12 años (2000-2011) y durante el periodo en que se desarrolló el experimento (2015) (Estación climática de campo experimental “La Huerta”, del Colegio de Postgraduados, Campus SLP).

Meses	Temperaturas °C				Precipitación	
	Máxima		Mínima		Promedio	Durante
	Promedio 12 años	Durante cultivo	Promedio 12 años	Durante cultivo	12 años	cultivo
<b>Agosto</b>	26.2	28.3	12.6	10.5	72.2	5.3
<b>Septiembre</b>	25.1	30.4	12.0	8.2	57.6	72.0
<b>Octubre</b>	24.5	29.1	8.9	6.5	32.9	67.1
<b>Noviembre</b>	23.0	28.0	5.1	4.5	9.8	18.7
<b>Diciembre</b>	21.8	26.4	2.8	0.1	11.4	5.0
<b>Promedio</b>	24.1	28.4	8.3	6.0	<b>Total</b>	
					<b>183.9</b>	<b>168.1</b>

Se observa en el Cuadro 9 la temperatura promedio máxima (24.1°C) en el periodo 2000-2011 durante los meses de agosto a diciembre, la que resultó menor con respecto al año 2015 (28.4 °C), en el mismo periodo. Manteniéndose por más tiempo las más bajas temperaturas promedio en el 2015 (6.0 °C), en comparación con el periodo 2000-2011 (8.3 °C). En la Figura 1 se aprecia como los rangos entre temperatura máxima y mínima son más amplios en el año 2015 en relación con los registrados entre los años 2000-2011. Considerando que la temperatura mínima para el crecimiento del cultivo del amaranto se encuentra por arriba de los 8 °C y la máxima está en los 35 °C, siendo el rango optimo para el desarrollo de 16 a 24 °C (Cristaudo *et al.*, 2007). Por lo tanto, es conveniente señalar que durante los meses de octubre, noviembre y diciembre las temperaturas mínimas promedio reportadas fueron: 6.5, 4.5 y 0.1°C; respectivamente. El límite inferior de temperatura para que el cultivo cese su crecimiento es de 8 °C y para que sufra daños fisiológicos 4 °C, es decir, el cultivo no tolera bajas temperaturas, mucho menos las heladas (Nieto, 1990). Esta condición ocasionó diferencias en el desarrollo de

las dos variedades de cultivo de amaranto, permitiendo que este a su vez afectara el menor o mayor rendimiento en la masa seca producida, aspecto que será analizado más adelante.



**Figura 1.** Distribución de la precipitación y el comportamiento de las temperaturas máxima y mínima promedio de 12 años (a) y durante el periodo en que se desarrolló el experimento (2015) (b).

### 3.3.1. Altura, número de hojas y materia fresca

Conocer el comportamiento de un cultivo bajo determinadas condiciones ambientales y de manejo, implica medir su tasa de crecimiento en relación al tiempo, y es posible expresarlo como altura, número de hojas, área foliar (Schwartz y Kläring, 2001) y estado fenológico, entre otros (Thompson *et al.*, 2000). En este estudio, la máxima altura que alcanzó el cultivo ocurrió al final de crecimiento del amaranto con 173.8 y 162.2 cm en la variedad Dorada y Frondosa respectivamente, no siendo significativa estadísticamente (Cuadro 10).

**Cuadro 10.** Altura de planta (cm), número de hojas (planta) durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas.

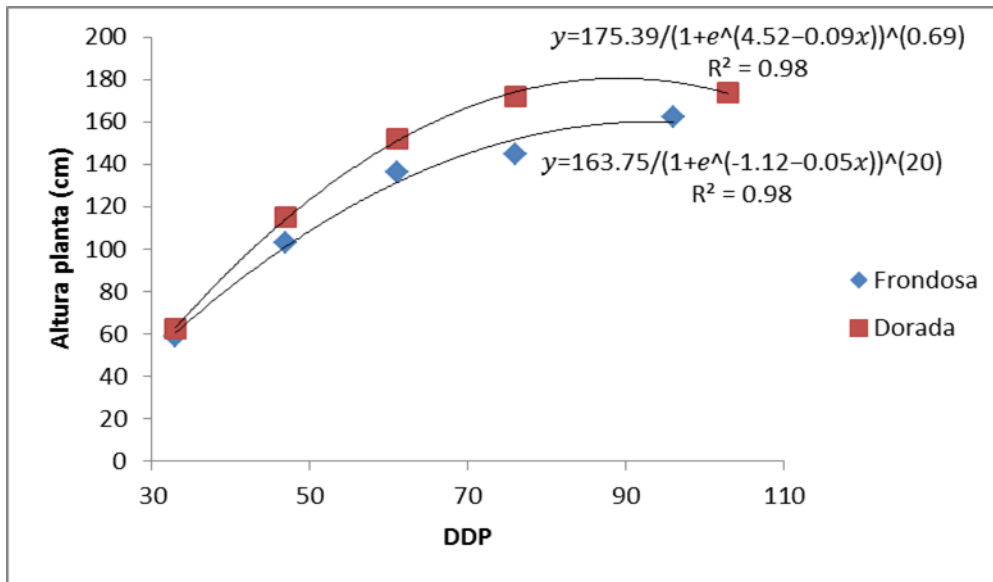
Variedad	Variable	Días después de la Plantación (DDP)					
		33	47	61	76	96*	103*

<b>Frondosa</b>	Altura de planta	58.5 <sup>a</sup>	103.0 <sup>a</sup>	136.5 <sup>a</sup>	144.4 <sup>b</sup>	162.2 <sup>a</sup>	-----
<b>Dorada</b>	(cm)	62.1 <sup>a</sup>	115.1 <sup>a</sup>	152.1 <sup>a</sup>	172.2 <sup>a</sup>	173.4 <sup>a</sup>	173.8 <sup>a</sup>
<b>Frondosa</b>	Número de	15 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	40 <sup>a</sup>	46 <sup>a</sup>	12 <sup>a</sup>	-----
<b>Dorada</b>	Hojas (planta)	14 <sup>a</sup>	21 <sup>b</sup>	24 <sup>b</sup>	37 <sup>b</sup>	20 <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

\* Madurez fisiológica

Sin embargo, se presentó diferencia significativa en altura de la planta entre las dos variedades a los 76 DDP, sobresaliendo la variedad Dorada (172.2 cm). Asimismo, al graficar las mediciones de altura de las plantas durante todo su ciclo, se observó que la variedad Dorada presentó una mayor tasa de crecimiento con respecto a la variedad Frondosa (Figura 2). Según la ecuación, las mayores tasas de crecimiento en altura para la variedad Frondosa ( $3.17 \text{ cm día}^{-1}$ ) y Dorada ( $3.77 \text{ cm día}^{-1}$ ) se obtuvo en el periodo de 33-47 DDP, respectivamente, periodo durante el cual la temperatura máxima ( $30.4 \text{ °C}$ ) y mínima ( $8.9 \text{ °C}$ ) se mantuvieron dentro del rango de crecimiento denominado óptimo para este cultivo (Cristaudo *et al.*, 2007).



**Figura 2.** Altura de planta (cm) alcanzada durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas en días después de plantación (DDP).

Con respecto al número de hojas ésta se relaciona con el área foliar, y es muy importante ya que determina el potencial de la actividad fotosintética (Klapwijk, 1986). El Cuadro 10 muestra que la variedad Frondosa tuvo una máxima acumulación de 46 hojas, de las cuales la mayor tasa de aparición de hojas ( $7.0$  hojas semana<sup>-1</sup>), se obtuvo en el periodo de 33-47 días DDP. La variedad Dorada acumuló sólo un total 37 hojas y la máxima tasas de aparición de hojas fue de  $3.5$  hojas semana<sup>-1</sup>, durante el mismo periodo. Siendo un 50% menor que la variedad Frondosa. Al final del ciclo el número de hojas en las dos variedades se redujo significativamente y resultó prácticamente igual. En este estudio, las mayores tasas de crecimiento en altura y en número de hojas coincidieron con los días grado de crecimiento acumulados (DGCA) ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante el periodo que fue de  $446$   $^{\circ}\text{C}$  y que representó el 48.97% y el 46.04 % de días grado de crecimiento (DGC) ( $^{\circ}\text{C}$ ) del total para la variedad Frondosa y Dorada, respectivamente (Cuadro 11). El requerimiento térmico acumulado de la plantación a madurez fisiológica del cultivo fue similar entre las dos variedades. Los DGC fueron de  $910.7$  y  $968.6$   $^{\circ}\text{C}$

para Frondosa y Dorada, respectivamente. DGC muy por debajo de los reportados para el amaranto (1629 °C) en los Valles Altos de México (Díaz-Ortega, *et al.*, 2004). Este resultado constituye la primera referencia con relación a DGC para amaranto en el Altiplano Potosino, que se caracteriza por un clima muy seco templado.

**Cuadro 11.** Días grado de crecimiento (DGC °C) acumulados durante el desarrollo y crecimiento en las dos variedades de amaranto estudiadas.

Variedad	Días después de la Plantación (DDP)					
	33	47	61	76	96	103
	DGC (°C)					
Frondosa	292.5	153.5	141.0	140.0	183.7	---
DGC acumulados °C	292.5	446.0	587.0	727.0	910.7	---
Dorada	292.5	153.5	141.0	140.0	183.7	57.9
DGC acumulados °C	292.5	446.0	587.0	727.0	910.7	968.6

En relación a la producción de biomasa fresca con un 84% de humedad (Cuadro 12 y Figura 3), la variedad de amaranto Dorada produjo un rendimiento medio de 278.4 g planta<sup>-1</sup>, muy superior (P<0.05) con respecto al obtenido con la variedad Frondosa (201.2 g planta<sup>-1</sup>), a los 76 DDP; fecha que correspondió precisamente a la diferencia significativa en altura encontrada entre ambas variedades.

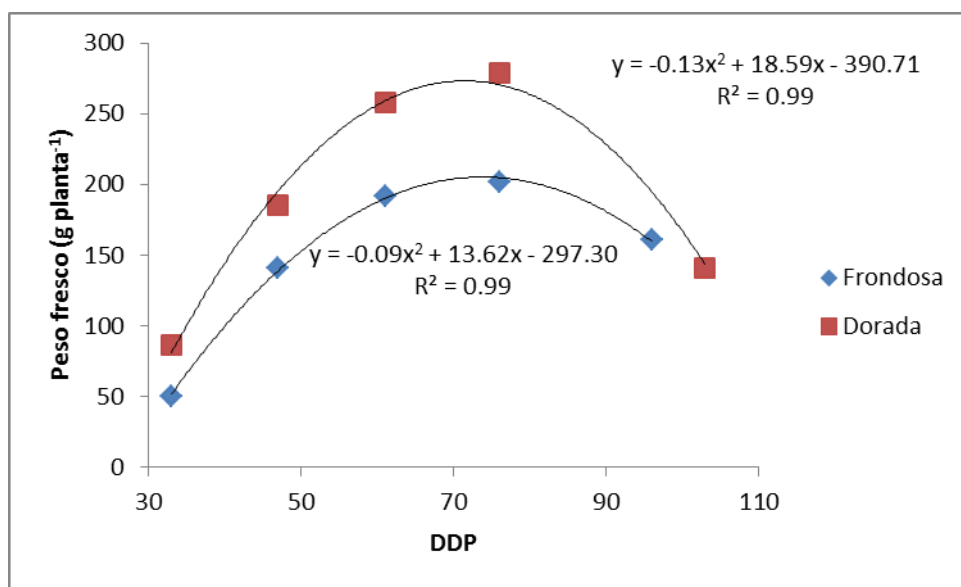
**Cuadro 12.** Producción de materia verde obtenida a días después de plantación (DDP) por planta (g) y en t ha<sup>-1</sup> (valores en paréntesis) durante el desarrollo y crecimiento de las dos variedades de amaranto estudiadas.

Materia fresca	Días después de la Plantación (DDP)					
	33	47	61	76	96*	103*
	Frondosa					
(g planta <sup>-1</sup> )	50.2 <sup>a</sup>	141.2 <sup>a</sup>	191.6 <sup>a</sup>	201.2 <sup>b</sup>	160.8 <sup>a</sup>	-----
(t ha <sup>-1</sup> )	(12.5) <sup>a</sup>	(35.3) <sup>a</sup>	(47.9) <sup>a</sup>	(50.3) <sup>b</sup>	(40.2) <sup>a</sup>	-----
Dorada						
(g planta <sup>-1</sup> )	86.8 <sup>a</sup>	185.1 <sup>a</sup>	258.2 <sup>a</sup>	278.4 <sup>a</sup>	195.8 <sup>a</sup>	141.2 <sup>a</sup>
(t ha <sup>-1</sup> )	(21.7) <sup>a</sup>	(46.2) <sup>a</sup>	(64.5) <sup>a</sup>	(69.6) <sup>a</sup>	(48.9) <sup>a</sup>	(35.3) <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

\* Madurez fisiológica

Estos valores expresan rendimientos de 69.6 y 50.3 t ha<sup>-1</sup>, al considerar la densidad de población establecida (25 plantas m<sup>-2</sup>); respectivamente. Estos valores fueron inferiores a los obtenidos en el ciclo primavera-verano por Pereyra *et al.* (2004) quienes reportan rendimientos promedios (con una densidad de 125,000 plantas ha<sup>-1</sup>) de 80.61 y 72.50 t ha<sup>-1</sup> para *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* respectivamente. En referencia a la eficiencia en el uso del agua (EUA), considerando una lámina de 321.4 mm en el ciclo, en la producción de biomasa fresca ésta fue mayor en la variedad Dorada (194.7 kg mm<sup>-1</sup>) con respecto a Frondosa (140.6 kg mm<sup>-1</sup>).



**Figura 3.** Peso de materia fresca (g planta<sup>-1</sup>) producida durante el ciclo de cultivo en las dos variedades de amaranto estudiadas en días después de plantación (DDP).

### 3.3.2. Área foliar

El mantener un flujo de crecimiento ordenado es de importancia para cultivos desarrollados bajo diversas condiciones o ambientes, esto asegura el rendimiento sostenido en el tiempo y el espacio. En el presente estudio, el área de las hojas (cm<sup>2</sup>), para *A. hypochondriacus*

variedad Frondosa, se incrementó en forma lineal durante los primeros 61 DDP iniciando con  $1002 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  y terminando con  $1827 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ , para enseguida descender a  $1613 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  y terminar con un descenso en área foliar a  $325.9 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ . Por su parte el *A. cruentus*, variedad Dorada, inició con  $1010 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  terminando con  $1751 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  hasta los 76 DDP, para disminuir a  $369.4 \text{ cm}^2 \text{ planta}^{-1}$  a los 103 DDP (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Valores de área foliar ( $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ ) determinados a días después de plantación (DDP) de las dos variedades de amaranto estudiadas.

Variedad	Días después de plantación (DDP)					
	33	47	61	76	96*	103*
	$\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$					
<b>Frondosa</b>	1002 <sup>a</sup>	1292 <sup>a</sup>	1827 <sup>a</sup>	1613 <sup>a</sup>	325.9 <sup>b</sup>	---
<b>Dorada</b>	1010 <sup>a</sup>	1092 <sup>a</sup>	1521 <sup>a</sup>	1751 <sup>a</sup>	922.9 <sup>a</sup>	369.4 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

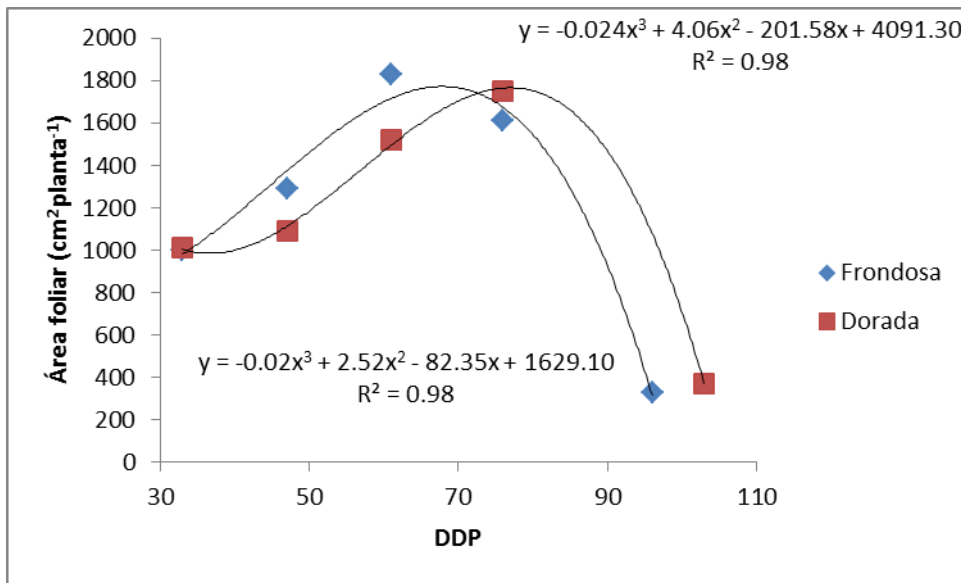
\* Madurez fisiológica.

De la Cruz-Guzmán *et al.* (2010) obtuvieron valores de área foliar alrededor de  $1550 \text{ cm}^2$  en *A. cruentus* en la etapa de floración, por abajo de los valores observados en el presente estudio, con un número aproximado de 46 de hojas  $\text{planta}^{-1}$ . Al respecto, se sabe que el desarrollo del área foliar de un cultivo anual de crecimiento determinado detiene su crecimiento vegetativo a la floración, además que una menor AF determina menor área de intercepción lumínica y por esto mismo tendría menos capacidad para producir fotoasimilados. En el presente estudio no se observó diferencia ( $P < 0.05$ ) del AF entre variedades hasta los 76 DDP, posteriormente debido a la madurez fisiológica se observa diferencia ( $P < 0.05$ ) del AF.

Este comportamiento también se aprecia en la Figura 4 y explica en cierta forma, que la variedad Frondosa, aunque no significativo estadísticamente, mostró una tendencia de un mejor crecimiento vigoroso durante los primeros 76 DDP (mayor número de hojas por planta), para después reducirse y sostenerse conforme se incrementaba la formación de la panoja y formación del grano, en comparación con la variedad Dorada. Este comportamiento indica que a medida que el área foliar se desarrolla, la radiación interceptada por las hojas se incrementa. Inicialmente el área foliar aumenta a una tasa exponencial, pero ésta al comienzo es pequeña y la radiación interceptada no es significativa por varias semanas. En floración el desarrollo del área foliar finaliza, siendo el objetivo de las prácticas culturales maximizar la fotosíntesis del cultivo



interceptando casi toda la radiación solar incidente. Esto es un patrón eficiente para cultivos como el amaranto en donde la mayoría del peso del grano proviene de la fotosíntesis luego de la floración.



**Figura 4.** Área foliar (cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) alcanzada a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.

Con base en lo anterior y debido a la dependencia entre ambas variables, el AF de las variedades de amaranto estudiadas se debe al número de las hojas y al tamaño de las mismas. Igualmente, el AF puede dar una idea del crecimiento de la planta o se puede relacionar con la acumulación de materia seca o con el metabolismo de la planta o bien con el rendimiento.

### 3.3.3. Componentes del rendimiento del grano

La biomasa de grano, componente importante del rendimiento de amaranto, está determinada por la relación entre la capacidad de la fuente y de los destinos reproductivos. En México se han desarrollado variedades de alto rendimiento potencial, caracterizadas por mayor número de granos; sin embargo, presentan heterogeneidad en el llenado de los mismos, siendo inferiores las que no alcanzan a llenarse en madurez fisiológica. La longitud (cm), y peso de la panoja (g); así como también el rendimiento de grano, índice de cosecha (%) y número de granos ( $g^{-1}$ ) obtenidos y determinados al final del ciclo en las dos variedades se concentran en el Cuadro 14.

**Cuadro 14.** Longitud (cm), peso de la panoja (g), rendimiento de grano ( $t\ ha^{-1}$ ), eficiencia en uso de agua ( $kg\ mm^{-1}$ ), índice de cosecha (%) y número de granos ( $g^{-1}$ ) determinados al fin del ciclo de cultivo de las dos variedades de amaranto estudiadas.

Variedad	Longitud de panoja (cm)	Peso de Panoja ( $g\ planta^{-1}$ )	Rendimiento de grano ( $t\ ha^{-1}$ )	Índice de cosecha (%)	Número de granos ( $g^{-1}$ )	Eficiencia en uso de agua EUA ( $kg\ mm^{-1}$ )
Frondosa	39.0 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>	2.30 <sup>a</sup>	18.0 <sup>a</sup>	1131.0 <sup>a</sup>	7.15 <sup>a</sup>
Dorada	33.3 <sup>a</sup>	12.7 <sup>b</sup>	1.40 <sup>b</sup>	12.0 <sup>b</sup>	1206.3 <sup>b</sup>	4.35 <sup>b</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

Con respecto al rendimiento en grano, la variedad Frondosa fue la que produjo el mayor ( $P < 0.05$ ) rendimiento ( $2.3\ t\ ha^{-1}$ ) con respecto a la variedad Dorada ( $1.4\ t\ ha^{-1}$ ). Los rendimientos medios de grano reportados para este cultivo en condiciones de riego en los ciclos primavera-verano y en otoño-invierno, son  $2.13$  y  $0.9\ t\ ha^{-1}$ ; respectivamente (SIAP, 2016). De ahí que los rendimientos en grano obtenidos por la variedad Frondosa y Dorada sean un 155% y 55% mayores, con respecto al reportado en el ciclo Otoño-Invierno; respectivamente. En referencia a la eficiencia en el uso del agua (EUA) para la producción de grano fue mayor en la variedad

Frondosa ( $7.15 \text{ kg mm}^{-1}$ ) con respecto a Dorada ( $4.35 \text{ kg mm}^{-1}$ ) y al reportado por Díaz-Ortega *et al.*, (2004) para Frondosa ( $4.83 \text{ kg mm}^{-1}$ ) con una densidad de 25 plantas  $\text{m}^{-2}$ .

El índice de cosecha (IC) de Frondosa resultó superior ( $P < 0.05$ ) (18.0%) al de la variedad Dorada (12.0 %). Al respecto, Díaz-Ortega, *et al.* (2004) reportan un IC de 10.3 %, mientras que Hauptli y Jain (1978) indicaron que el valor de IC para especies de amaranto domesticadas es de 10 a 15%.

La variedad Frondosa al final del ciclo, produjo panojas más pesada ( $p < 0.05$ ) (22.1 vs 12.7 g/planta) y un menor número de granos por g (1131 vs 1206) que la Dorada, respectivamente. Así mismo, la variedad Frondosa tuvo una longitud de la panoja de 39 cm similar a la variedad Dorada (33 cm), valores muy inferiores a los reportados por Díaz-Ortega, *et al.* (2004) (61 cm).

#### **3.3.4. Acumulación de materia seca**

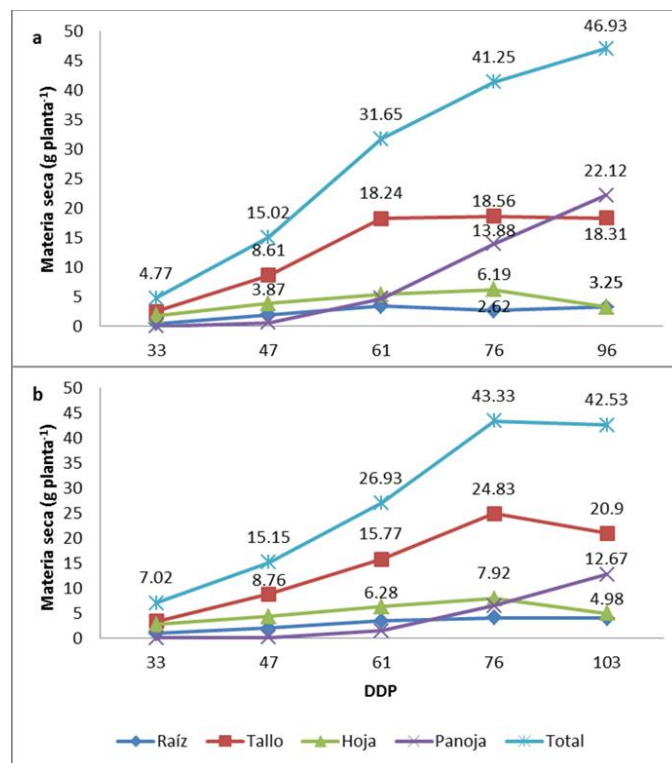
La Figura 5, muestra la acumulación de materia seca total y su distribución en hojas, tallo, panoja y raíz. La mayor tasa de producción de materia seca total para la variedad Frondosa ocurrió durante el periodo de 47 al 61 DDP ( $1.18 \text{ g planta día}^{-1}$ ). Mientras que en la Variedad Dorada, la mayor tasa la obtuvo durante el periodo de los 61 al 76 ( $1.09 \text{ g planta día}^{-1}$ ).

En general, la materia seca es destinada en mayor proporción hacia las estructuras reproductivas (grano, frutos) y en menor cantidad hacia las estructuras vegetativas; el desarrollo de un cultivo puede variar dependiendo de la especie, de la época del año y de las condiciones ambientales (Andriolo y Falcão, 2000; Costa y Giacomelli, 2005). En ambas variedades se observó un crecimiento lineal de la panoja, aunque en Frondosa la aparición de la inflorescencia

ocurrió unos días antes que, en Dorada, lo cual repercutió en el mayor rendimiento de grano en Frondosa.

En cuanto a hoja y tallo, ambas estructuras descendieron su crecimiento a partir de la etapa de formación de grano (76 DDP), siendo este decremento similar entre ambas variedades. Lo anterior se atribuye principalmente al control que ejercen algunos tejidos, en este caso las semillas, al demandar productos para su desarrollo (Vaieretti *et al.*, 2007).

Relacionado con la raíz, en ambas variedades se presenta un desarrollo similar, sin embargo, en Frondosa se observó un descenso a los 76 DDP, lo cual puede asociarse a la demanda de fotosintatos de la panoja para la formación de grano (Nielsen y Veierskov, 1998).



**Figura 5.** Acumulación de materia seca (g planta<sup>-1</sup>) determinada a días después de plantación (DDP) en las variedades de amaranto Frondosa (a) y Dorada (b) estudiadas.

El Cuadro 15 muestra los modelos matemáticos obtenidos para expresar el comportamiento de la acumulación de materia seca del cultivo del amaranto. Las variables peso PSH, PSTa, PSP, PSR y PST, significan la biomasa de la hoja, biomasa del tallo, biomasa de la panoja, biomasa de la raíz y biomasa total por planta, respectivamente, en relación a los días DDP.

**Cuadro 15.** Modelos matemáticos obtenidos en la acumulación de biomasa total (PST), en hoja (PSH), en tallo (PSTa), en Panoja (PSP) y en raíz (PSR) en las dos variedades de amaranto, expresados como DDP (x).

Variedad	Ecuación	Valor de R <sup>2</sup>
Frondosa	$PST = -1.15x^2 + 17.98x - 13.33$	0.98
Dorada	$PST = -0.99x^2 + 15.81x - 9.59$	0.95
Frondosa	$PSH = -0.74x^2 + 5.30x - 2.37$	0.84
Dorada	$PSH = -0.76x^2 + 5.06x - 2.76$	0.90
Frondosa	$PSTa = -1.22x^2 + 12.46x - 9.17$	0.91
Dorada	$PSTa = -1.58x^2 + 13.62x - 10.28$	0.96
Frondosa	$PSP = 1.12x^2 - 3.53x + 2.45$	0.99
Dorada	$PSP = 1.34x^2 - 2.45x + 0.62$	0.99
Frondosa	$PSR = -0.22x^2 + 2.16x - 1.12$	0.98
Dorada	$PSR = -0.28x^2 + 2.32x - 1.52$	0.88

Este tipo de ecuaciones han sido desarrolladas para diversos cultivos (Thompson *et al.*, 2000) y sirven para proveer información acerca de la forma y velocidad en que éstos crecen y se desarrollan en relación con el tiempo y condiciones ambientales (Heuvelink, 1995; Heuvelink, 1996; Heuvelink, 1999; Bugarín-Montoya *et al.*, 2001).

La más alta tasa de producción de materia seca total se observó en la variedad Frondosa. Sin embargo, en las dos variedades la biomasa correspondiente a la panoja (PSP) dio inicio a los 61 DDP ascendiendo ésta hasta los 103 DDP, mostrando los valores medios más altos de Frondosa desde el inicio (4.65 g planta<sup>-1</sup>) hasta el final (21.12 g planta<sup>-1</sup>). Se observa además en la Figura 5, una reducción de la biomasa en tallo y hoja a partir de los 76 DDP.

### 3.3.5. Partición de la biomasa seca en estructuras de la planta

Al final del estudio, la variedad Frondosa acumuló 46.93 g de materia seca planta<sup>-1</sup> mientras que la variedad Dorada, 42.53 g de materia seca planta<sup>-1</sup> Figura 5. Con excepción del porcentaje de partición a los 96 DDP de la variedad Frondosa (39.01%), resultó muy evidente, que la partición de biomasa seca durante todo el ciclo fue mayor en el tallo, alcanzando valores de hasta 57.63% y 58.58% a los 61 DDP en las variedades Frondosa y Dorada; respectivamente. En las dos variedades se observó que el coeficiente de partición de materia seca correspondiente a las hojas fue más alto a los 33 DDP (alrededor del 38%), disminuyendo éste coeficiente a medida que adelantó el crecimiento y desarrollo del cultivo, alcanzando valores más bajos a los 96 DDP (6.93%) y 103 DDP (11.70%) en las variedades Frondosa y Dorada respectivamente (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Coeficientes de partición de materia seca (%) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto evaluadas.

Variedad	DDP	Hoja	Tallo	Panoja	Raíz
		%			
Frondosa	33	38.46	51.92	0.00	9.62
	47	25.73	57.31	4.09	12.87
	61	16.95	57.63	14.69	10.73
	76	15.00	45.00	33.64	6.36
	96	6.93	39.01	47.13	6.93
Dorada	33	38.27	48.15	0.00	13.58
	47	28.32	57.80	0.58	13.29
	61	23.30	58.58	5.50	12.62
	76	18.28	57.29	14.99	9.45
	103	11.70	49.15	29.79	9.36

Por el contrario, la mayor asignación de biomasa correspondiente a la panoja, inició desde los 47 DDP en la variedad Frondosa con un 4.09% hasta un 47.13% a los 96 DDP. Valores

superiores a los cuantificados en la variedad Dorada ya que prácticamente la asignación de materia a la panoja apareció a los 61 DDP (5.50%) y alcanzó un coeficiente de partición de materia seca en panoja de solo 29.79% a los 103 DDP (Cuadro 16). Este hecho tiene que ver principalmente con el control que ejercen algunos tejidos, en este caso las semillas, al demandar productos para su desarrollo y crecimiento.

El conocimiento del desarrollo foliar es fundamental ya que las hojas son los principales órganos sintetizadores de fotoasimilados, los cuales son translocados posteriormente a los distintos órganos de la planta. En este contexto se ha indicado que el contenido de materia seca foliar ha sido empleado, en forma creciente, como un indicador de la estrategia de uso de recursos por parte de las especies vegetales (Vaieretti *et al.*, 2007), lo cual se refiere a la posición del follaje en una relación costo-beneficio entre una rápida asimilación y crecimiento, por un lado, y la conservación eficiente de recursos dentro de tejidos bien protegidos, en el otro extremo (Garnier *et al.*, 2001; Díaz *et al.*, 2004).

Algunos investigadores, han encontrado que la mayor cantidad de materia seca, es destinada en mayor proporción hacia las estructuras reproductivas (grano, frutos) y en menor proporción hacia las estructuras vegetativas. Además, cuanto más activo sea el crecimiento de una parte de la planta, tanto más demandará materiales disponibles, y tanto más se restringirá el crecimiento en otras partes. Asimismo, se ha encontrado que el desarrollo y crecimiento de una planta resulta ser diferente entre estaciones, repercutiendo en una mayor acumulación de biomasa durante la primavera en relación al cultivo de otoño. Estos y otros estudios (Andriolo y Falcão, 2000) refuerzan la premisa de desarrollar tecnología de producción de cultivos para cada región en particular (Etchevers, 1999).

### 3.3.6. Índices fisiológicos de crecimiento

#### 3.3.6.1. Tasa relativa de crecimiento (TRC)

La TRC es un índice de eficiencia que expresa el crecimiento en términos de una tasa de incremento en tamaño por unidad de tiempo (Hunt, 1982). La TRC es una constante fisiológica que representa la eficiencia de la planta como productora de material nuevo. Por tanto, puede ser llamada índice de eficiencia de producción de materia seca, cuyo valor varía con cada variedad. La TRC es un parámetro de crecimiento muy sensible a las condiciones climáticas donde se desarrolla el cultivo y depende de la acumulación de materia seca en el tiempo. En nuestro caso hubo diferencias significativas entre variedades de los 47 a los 76 DDP (Cuadro 17), sin embargo, los más altos valores se expresan en plantas más jóvenes de amaranto desarrolladas de los 33-47 DDP: Frondosa (0.09) y Dorada (0.07) ( $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y los más bajos de los 76-96 DDP (0.02 y 0.01  $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en las variedades de Frondosa y Dorada, respectivamente. El significado biológico de los valores de la TRC al inicio de la etapa vegetativa se explica porque existe mayor eficiencia en la producción de biomasa total por gramo de materia seca plantat<sup>-1</sup>, la cual tiende a decrecer al final de ciclo de vida. Los valores también indican que las condiciones ambientales del Altiplano Potosino son favorables para el crecimiento de estas dos variedades, sobresaliendo Frondosa. Mapes *et al.* (1995) en *A. hypochondriacus* reportan valores de TRC muy similares a los encontrados en el presente estudio.

Barraza *et al.* (2004) mencionan que existe correlación entre el proceso de crecimiento y desarrollo de diversas partes de la planta, que puede explicarse en términos del suministro y la demanda. Cuanto más activo sea el crecimiento de una parte de la planta, tanto más demandará materiales disponibles, y tanto más se restringirá el crecimiento en otras partes.



### 3.3.6.2. Tasa de asimilación neta (TAN)

La TAN es una medida de la eficiencia promedio de las hojas de la planta de un cultivo (Hunt, 1982; Beadle, 1988), es decir, es una medida indirecta de la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar en una unidad de tiempo; esta no es constante y decrece con la edad de la planta o población. Con base en esta premisa y según los resultados obtenidos, se observó que la tendencia de la TAN en Frondosa tuvo su máxima eficiencia de las plantas como sistema asimilatorio a los 47-61 ( $1.0 \text{ mg cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ) y el resto de periodos mantuvo una TAN de  $0.6 \text{ mg cm}^2 \text{ día}^{-1}$ . Mientras que, para Dorada, los valores máximos de TAN fueron alcanzados entre los 47-76 DDP con un valor de  $0.8 \text{ mg cm}^2 \text{ día}^{-1}$  (Cuadro 17).

**Cuadro 17.** Valores de índices de crecimiento fisiológicos: Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN) y Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.

Variedad	Índice de crecimiento	DDP			
		33-47	47-61	61-76	76-96
FRONDOSA	TRC ( $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )	0.09 <sup>a</sup>	0.06 <sup>a</sup>	0.02 <sup>b</sup>	0.02 <sup>a</sup>
DORADA		0.07 <sup>a</sup>	0.04 <sup>b</sup>	0.04 <sup>a</sup>	0.01 <sup>a</sup>
FRONDOSA	TAN ( $\text{mg cm}^2 \text{ día}^{-1}$ )	0.6 <sup>a</sup>	1.0 <sup>a</sup>	0.6 <sup>b</sup>	0.6 <sup>a</sup>
DORADA		0.5 <sup>b</sup>	0.8 <sup>b</sup>	0.8 <sup>a</sup>	0.6 <sup>a</sup>
FRONDOSA	TCC ( $\text{g dm}^2 \text{ día}^{-1}$ )	0.038 <sup>a</sup>	0.058 <sup>a</sup>	0.035 <sup>a</sup>	0.033 <sup>a</sup>
DORADA		0.030 <sup>a</sup>	0.043 <sup>a</sup>	0.053 <sup>a</sup>	0.021 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

Las plantas de *A. hypochondriacus* con los mayores valores de TAN fueron significativamente las más eficientes de los 33 a 61 DDP, mientras que *A. cruentus* tuvo mayor eficiencia de los 61-76 DDP (Cuadro 17). El incremento inicial en la TAN, se explica por la alta actividad asimilatoria de hojas jóvenes debido a la demanda de fotosintatos por los tejidos en

crecimiento y baja actividad respiratoria de las diferentes partes de la planta. La disminución de la TAN con la edad de las plantas ha sido explicada en parte porque la proporción del tejido respiratorio es mayor al tejido fotosintético y porque disminuye la capacidad fotosintética por unidad de área relacionada con la longevidad foliar (Díaz-Ortega, 1994). En relación con lo anterior, según Barraza *et al.* (2004), los mayores valores de TAN indican mayor ganancia de materia seca por unidad de tejido asimilatorio y por unidad de tiempo, lo cual indica una mayor eficiencia fotosintética promedio.

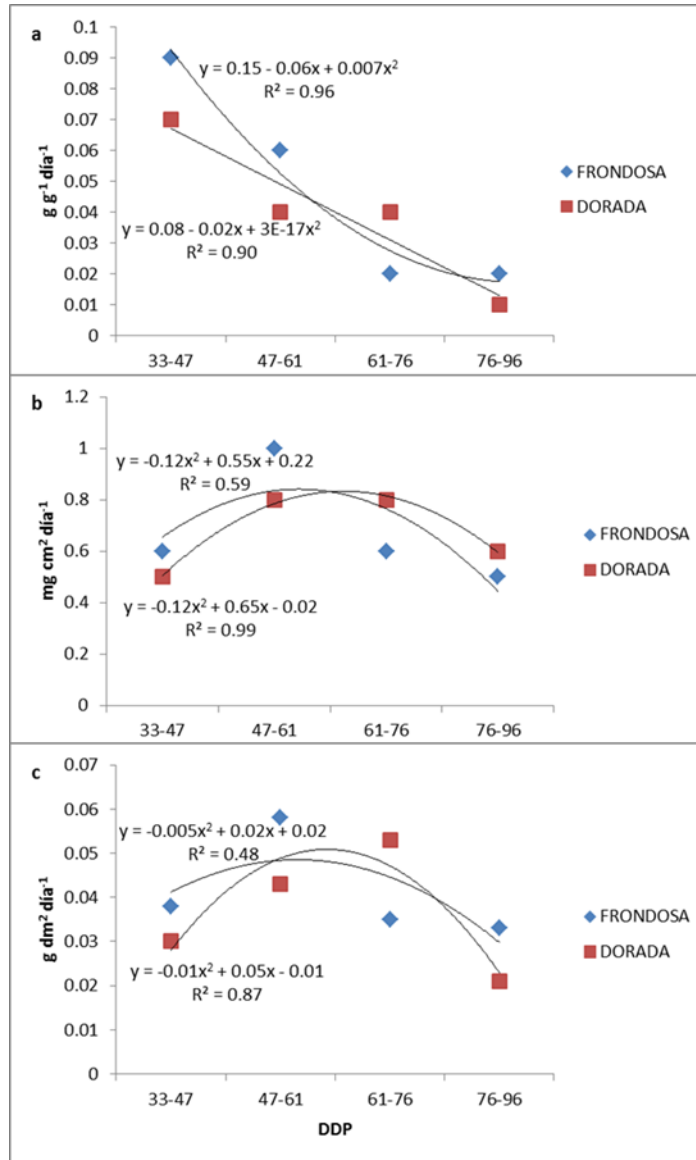
### **3.3.6.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC)**

El término que describe con más precisión el crecimiento de un cultivo es la acumulación de materia seca por unidad de área por unidad de tiempo, o sea, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). La TCC es usualmente expresada en  $\text{g dm}^2 \text{ día}^{-1}$ . La TCC de una especie está relacionada estrechamente a la intercepción de radiación solar. En nuestro caso, la TCC de la variedad Frondosa alcanzó el mayor valor a los 47-61 DDP ( $0.058 \text{ g dm}^2 \text{ día}^{-1}$ ), mientras que la variedad Dorada lo logró de los 61-76 DDP ( $0.053 \text{ g dm}^2 \text{ día}^{-1}$ ). Durante todo el ciclo las diferencias en las TCC entre las dos variedades no fueron significativas estadísticamente (Cuadro 17). Al final del ciclo los valores de TCC disminuyeron en ambas variedades evaluadas observándose el valor más bajo en la variedad Dorada ( $0.021 \text{ g dm}^2 \text{ día}^{-1}$ ).

Para los dos materiales se observó que en general de los 33-47 DDP, el crecimiento del cultivo fue lento debido a que existieron pocas hojas en relación con el área del suelo. A partir de este momento, se incrementó el número de hojas y el área foliar, en la misma área del suelo, por tanto, se aumentaron los valores de TCC, lo que se observa en la curva como un aumento logarítmico (Figura 6c). Estos resultados coinciden con los reportados por Barraza *et al.* (2004)

en tomate (*Lycopersicon esculentum*), en donde la TCC aumentó rápidamente hasta alcanzar un máximo, y posteriormente este índice de crecimiento decreció en forma acelerada. Asimismo, los mayores valores de TCC reflejan mayor ganancia en peso de materia seca por unidad de superficie del suelo y de tiempo. También se observó que a partir del día 33 DDP las plantas de amaranto empezaron a depender de su capacidad fotosintética, para incrementar sus tasas de crecimiento en forma independiente de las reservas aún existentes en la semilla.

En la Figura 6, se muestra la tendencia y ecuaciones de ajuste de TRC, TAN y TCC en el tiempo, para *A. hypochondriacus* (Froncosa) y *A. cruentus* (Dorada).



**Figura 6.** Curvas de índices fisiológicos: Tasa relativa de crecimiento (TRC) (a), Tasa de asimilación neta (TAN) (b) y Tasa de crecimiento de cultivo (TCC) (c) determinadas a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.

### 3.3.7. Índices morfológicos de crecimiento

#### 3.3.7.1. Área foliar específica (AFE)

El AFE es una medida de la superficie foliar de la planta en términos de densidad o grosor relativo de la hoja. Se define como la relación entre el área total de la hoja y la masa del

área foliar de la planta (Flórez *et al.*, 2006). El área foliar específica (AFE) mostró diferencias al inicio y al final ( $p \leq 0,05$ ) del estudio. A los 33 y 96 DDP la variedad Frondosa tuvo los valores más altos ( $550.30$  y  $110.25 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , respectivamente) con respecto a la variedad Dorada ( $362.68$  y  $60.03 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , respectivamente). (Cuadro 18).

**Cuadro 18.** Valores de índices de crecimiento morfológico: Área foliar específica (AFE), Duración del área foliar (DAF), Índice de área foliar (IAF), Razón de área foliar (RAF) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.

Variedad	DDP				
	33	47	63	76	96
	Área foliar específica ( $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )				
Frondosa	500.30 <sup>a</sup>	311.04 <sup>a</sup>	311.73 <sup>a</sup>	266.15 <sup>a</sup>	110.25 <sup>a</sup>
Dorada	362.68 <sup>b</sup>	263.42 <sup>a</sup>	237.24 <sup>a</sup>	216.18 <sup>a</sup>	60.03 <sup>b</sup>
	DDP				
	33-47	47-61	61-76	76-96	
	DAF (día)				
Frondosa	7.17 <sup>a</sup>	9.75 <sup>a</sup>	11.52 <sup>a</sup>	10.76 <sup>b</sup>	
Dorada	6.57 <sup>a</sup>	8.02 <sup>a</sup>	10.96 <sup>a</sup>	13.31 <sup>a</sup>	
	IAF				
Frondosa	0.80 <sup>a</sup>	1.10 <sup>a</sup>	1.13 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	
Dorada	0.71 <sup>a</sup>	0.92 <sup>a</sup>	1.24 <sup>a</sup>	0.57 <sup>a</sup>	
	RAF ( $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ )				
Frondosa	182.78 <sup>a</sup>	94.41 <sup>a</sup>	67.59 <sup>a</sup>	31.13 <sup>a</sup>	
Dorada	141.59 <sup>a</sup>	91.89 <sup>a</sup>	67.64 <sup>a</sup>	24.93 <sup>a</sup>	

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

En general, la tendencia que se observó fue que el AFE disminuye conforme avanzó el ciclo de cultivo en ambas variedades (Figura 7). Al respecto, se menciona que a medida que las plantas cambian en el tiempo, reajustan su asignación de biomasa, morfología y fisiología foliar. Como consecuencia de ello, el AFE podría cambiar con el tamaño de la planta, disminuyendo

generalmente a lo largo del tiempo, sobre todo en las especies de crecimiento rápido. Lo cual fue observado en este estudio.

### ***3.3.7.2. Índice de área foliar (IAF)***

Este parámetro expresa la superficie de la hoja por unidad de área de superficie ocupada por la planta. Aumenta con el crecimiento del cultivo hasta alcanzar un valor máximo en el cual se alcanza la máxima capacidad para interceptar la energía solar, momento en que la TCC es a su vez máxima (Hunt, 1990). Los resultados obtenidos muestran que el IAF, para los dos materiales de amaranto evaluados, fue de tendencia ascendente, mostrando de los 33 hasta los 76 DDP un incremento (Froncosa: de 0.80 a 1.13 y Dorada: 0.71 a 1.24); y a partir de esta fecha, una disminución en los valores de IAF hasta de un 54.86 y 45.96%, respectivamente. Este mismo comportamiento se presentó en los valores de TCC, expuesto anteriormente (Cuadro 17). El IAF usualmente aumenta durante el crecimiento y desarrollo de un cultivo hasta que la mayoría de las plantas alcanzan la fase reproductiva. La reducción del IAF pudo ser causado por una disminución en el área foliar específica (incremento de biomasa por unidad de área foliar) y/o una disminución en la proporción de masa seca acumulada en los tejidos foliares (Curtis y Läuchli, 1986).

### ***3.3.7.3. Duración del área foliar (DAF)***

Para relacionar la producción de materia seca con el IAF, Watson (1947) integró el IAF en el tiempo y llamó a esto duración del área foliar (DAF), la cual toma en cuenta tanto la duración como la cantidad de tejido fotosintético de la parte aérea de una población vegetal del cultivo. La duración del área foliar; se expresa como tiempo (días o semanas). En los cultivos

anuales, el área foliar que surge de la semilla es pequeña pero, bajo condiciones favorables, se incrementa a una tasa exponencial.

Usualmente la DAF está muy relacionada con el rendimiento, debido a que la intercepción de la radiación solar durante un largo periodo de tiempo generalmente significa mayor producción de materia seca. Las grandes diferencias en la biomasa total producida son, frecuentemente, el resultado de la duración de la fotosíntesis como de la tasa fotosintética. La duración del área foliar es fácilmente mensurable y, debido a que ésta relacionada con la producción de materia seca, puede dar una idea de la productividad del cultivo.

Lo anterior es congruente con los valores de DAF obtenidos con la variedad Frondosa durante su ciclo de crecimiento y desarrollo. Estos resultaron ligeramente más altos, no fueron significativos, desde los 33 (7.17 días) hasta los 76 (11.52 días) DDP con respecto a la variedad Dorada durante el mismo periodo (6.57 y 10.96 días, respectivamente). Es pertinente señalar que en esta última variedad la DAF a los 78 DDP dio un valor significativamente superior (13.31 días) con respecto a la variedad Frondosa (10.76 días), Cuadro 18.

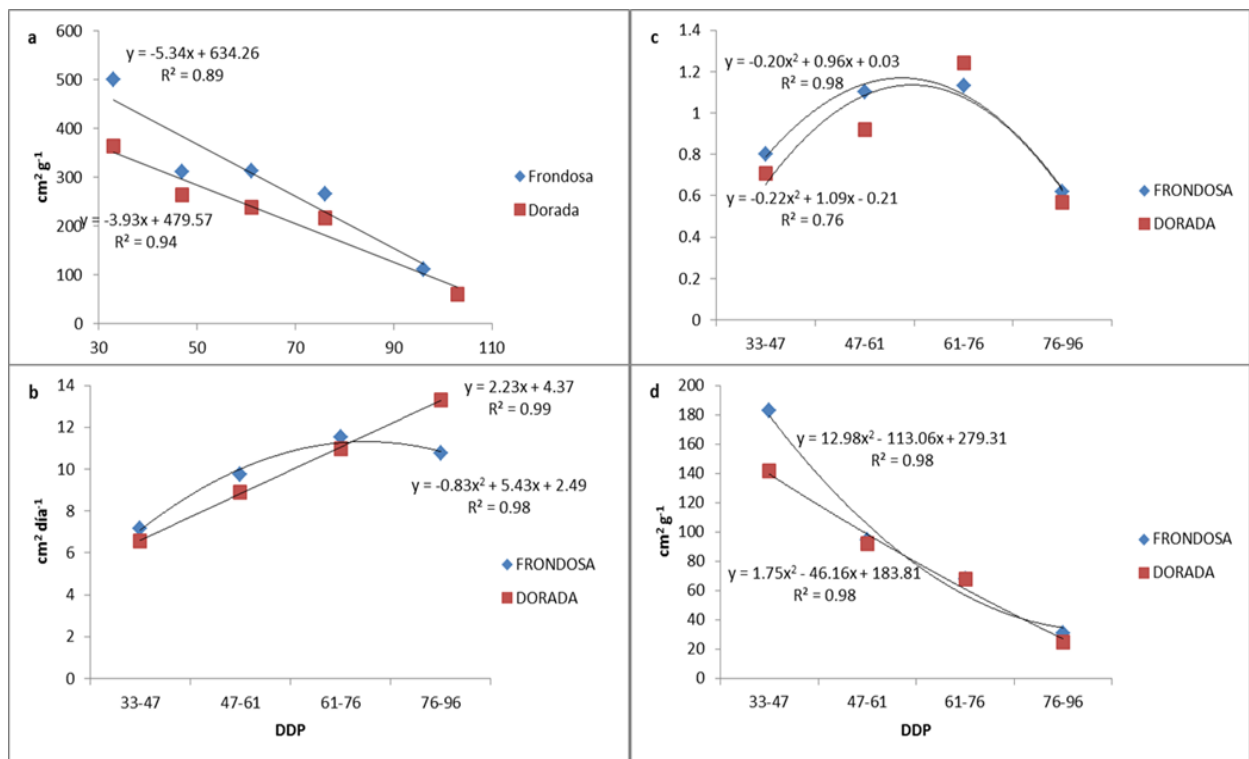
En este estudio, los valores de DAF pueden representar una buena medida del rendimiento en grano en amaranto si es medido desde emergencia de la panoja hasta madurez fisiológica, aunque la producción fotosintética de la panoja podría hacer, como en otros cultivos como el trigo, una buena contribución al rendimiento en grano. A causa de que la mayoría de los carbohidratos almacenados en el grano provienen de la fotosíntesis producida luego de la emergencia de la panoja, y debido a que la duración fotosintética de la panoja está relacionada a la DAF, esta puede ser correlacionada con el rendimiento.

#### ***3.3.7.4. Razón de área foliar***

La razón de área foliar (RAF), es uno de los principales parámetros morfológicos, utilizado para evaluar la relación entre el área foliar (sistema asimilatorio) y el peso seco total de la planta. De acuerdo con el Cuadro 18, no se observó diferencias significativas en los valores de RAF entre variedades. Teniendo ambas al inicio del crecimiento, en la etapa vegetativa los valores más altos, Frondosa 182.78 y Dorada 141.59 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup>, para descender en la etapa de madurez fisiológica a valores de 31.13 y 24.93 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. La tendencia decreciente de la RAF (Figura 7) se puede explicar, considerando el incremento en biomasa de la planta durante el ciclo de crecimiento, el cual proviene principalmente del incremento en peso de órganos como es la panoja.

En la Figura 7, se muestra la tendencia y ecuaciones de ajuste de Área foliar específica (AFE), Duración del área foliar (DAF), Índice de área foliar (IAF) y Relación de área foliar (RAF) en el tiempo, para *A. hypochondriacus* (Frondosa) y *A. cruentus* (Dorada).





**Figura 7.** Curvas de índices morfológicos de crecimiento: Área foliar específica (AFE) (a), Duración del área foliar (DAF) (b), Índice de área foliar (IAF) (c) y Relación de área foliar (RAF) (d) determinados a días después de plantación (DDP) en las dos variedades de amaranto estudiadas.

### 3.4. Conclusiones

1. La variedad Frondosa (*A. hypochondriacus*) presentó la mayor aparición de hojas planta<sup>-1</sup> (periodo de 33-47 DDP).
2. El requerimiento térmico acumulado de la plantación a madurez fisiológica resultó similar para las dos variedades: Frondosa (910.7 °C) y Dorada (978.6 °C). El 48.97% y el 46.04 % de unidades calor del total para el *A. hypochondriacus* variedad Frondosa y *A. cruentus* variedad Dorada se determinaron a los 47 DDP (etapa vegetativa). Estos resultados constituyen la primera referencia con relación a GDC para amaranto en el Altiplano Potosino, que se caracteriza por un clima muy seco templado.

3. El área foliar, hasta los 63 DDP del *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, resultó ligeramente más alta, aunque no significativamente, al *A. cruentus*. No obstante, *A. hypochondriacus* obtuvo significativamente un mayor rendimiento en grano, en peso de panoja, índice cosecha, número de granos  $g^{-1}$ . El *A. cruentus*, variedad Dorada tuvo la mayor producción y EUA en biomasa verde. Por otra parte, el *A. hypochondriacus* también mostró significativamente una mayor EUA en grano.
4. La partición de biomasa seca durante todo el ciclo fue mayor en el tallo, alcanzando valores de hasta 57.63% y 58.58% a los 61 DDP en ambas variedades. Mientras que el coeficiente de partición de materia seca correspondiente a las hojas fue más alto a los 33 DDP (alrededor del 38%). Con respecto a la biomasa correspondiente a la panoja (PSP), los valores medios más altos los expresó, *A. hypochondriacus* variedad Frondosa desde el inicio (4.65 g por planta) hasta el final (21.12 g por planta).
5. El indicador fisiológico TAN resultó mayor estadísticamente en *A. hypochondriacus* desde los 33 hasta los 61 DDP con respecto a *A. cruentus*. Mientras que éste último resultó significativamente diferente en TRC de los 61-76 DDP. El *A. hypochondriacus* mostró un valor mayor significativo en TRC de los 47 a 61 DDP. Durante todo el ciclo las diferencias en las TCC entre las dos variedades no fueron significativas estadísticamente.
6. Los indicadores morfológicos mostraron que el *A. hypochondriacus* variedad Frondosa tuvo los valores significativamente más altos en AFE a los 33 y 96 DDP con respecto al *A. cruentus* variedad Dorada. Asimismo, se observó que los valores de IAF y RAF tendieron a ser más altos en la primera variedad. Mientras la DAF de los 76-96 DDP fue significativamente superior en *A. cruentus* variedad Dorada.

7. Con base en los resultados obtenidos en IC en este estudio, indican que las condiciones ambientales del Altiplano Potosino son favorables para el crecimiento de estas dos variedades, sobresaliendo *A. hypochondriacus* variedad Frondosa para la producción de grano mientras que *A. cruentus* variedad Dorada, para forraje.

## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y EFICIENCIA FISIOLÓGICA DEL AMARANTO BAJO IRRIGACIÓN EN INVERNADERO

### 4.1. Introducción

El amaranto (*Amaranthus* spp), tiene enormes posibilidades y perspectivas técnicas de desarrollo en México. Las características agroclimáticas, edáficas y tecnológicas existentes son adecuadas y propicias para su plantación. Por su potencial agronómico y su alto valor nutritivo es una opción para diversificar la producción y mejorar la alimentación de la población (Becker *et al.*, 1981). El amaranto por ser una planta C<sub>4</sub> presenta tolerancia al déficit de agua (Lal y Edwards, 1996), mediante mecanismos como la capacidad de ajuste osmótico (1.08-1.24 MPa), reducción del crecimiento foliar y conductancia estomática (Liu y Stützel, 2002 a, b). Sin embargo, el estrés hídrico durante cierto periodo disminuye la producción de materia fresca y seca (Ejjeji y Adeniran, 2010), altera la proporción de biomasa decreciendo la parte aérea y aumentando la radical (Liu y Stützel, 2004), además promueve la acumulación de sustancias antinutricionales como oxalatos y taninos que disminuyen la calidad nutrimental (Becerra, 2000; Paredes-López *et al.*, 2006).

A nivel nacional se registra una superficie de siembra de amaranto (*Amaranthus* spp.) de 6,489.96 ha, con una producción estimada de poco más de 8,551 ton y con un rendimiento medio de 1.34 t ha<sup>-1</sup>. En el estado de San Luis Potosí, se reporta sólo una superficie sembrada de 30.56 ha con un rendimiento medio de 0.82 t ha<sup>-1</sup>, inferior a la media nacional (SIAP, 2016). De forma comercial se cultiva el amaranto en condiciones de temporal, teniendo sólo de un 2 a 4% de la superficie sembrada con riego, encontrándose éstas principalmente en zonas del norte del país (SIAP, 2016). A pesar de que el agua tiene impacto importante en la producción en amaranto

(Ejjeji y Adeniran, 2010), existe poca información respecto a su demanda hídrica (Díaz-Ortega *et al.*, 2004), limitándose la mayoría de las recomendaciones a mencionar las precipitaciones adecuadas (800 a 1200 mm) para el desarrollo de la producción (Taboada y Guadarrama, 2007). También, señalan que el cultivo del amaranto requiere de riego, especialmente en los primeros 30 días a partir de la emergencia y posteriormente en la etapa de floración, formación de la panoja y llenado del grano. Con respecto a salinidad, la planta de amaranto puede desarrollarse adecuadamente a concentraciones de 0 a 0.2% ( 2 g l<sup>-1</sup>), arriba de ésta y hasta 0.4% (4g l<sup>-1</sup>) la planta crece pero se genera cierto daño en alguna etapa vegetativa, en tanto que a partir de 0.5% (5 g l<sup>-1</sup>) se inhibe totalmente (Macler y MacElroy, 1989).

Mediante la investigación se han valorado los tipos de riego por surco, por inundación, por aspersión y por goteo, encontrando que todos tienen rentabilidad económica. Asimismo, son considerablemente conocidas las ventajas que supone la fertigación localizada, ahorro de agua, fertilizantes, mano de obra, labores culturales, a la vez que se incrementa el rendimiento de los cultivos en términos de mayor producción, calidad y precocidad de las cosechas, (Okunade *et al.*, 2009). Croft *et al.*, (2017) en sistemas hidropónicos, evaluaron la viabilidad para producir amaranto como verdura con alto contenido de hierro, zinc y carotenos; encontrando que técnicamente éste sistema es viable además de poder controlar la concentración de nutrientes, pero que, comparado con la producción en suelo, económicamente no es viable.

Sin embargo, un sistema hidropónico es útil para la investigación, cuando no existe información de mayor precisión con respecto a la relación entre el agua, nutrimental y la producción dado que esta es compleja de establecer debido a la intervención de varios factores como el suelo, clima, variedad y etapa fenológica (Ejjeji y Adeniran, 2010). Por ejemplo, en *A. hypochondriacus* en etapa vegetativa, se ha reportado que la restricción de agua tiene mayor

impacto negativo, mientras que para *A. cruentus* ocurre en floración y en ambas especies al momento de llenado del grano tiene menor efecto sobre el rendimiento del mismo (Ayodele, 2000). Por lo que la determinación de la producción en función del agua generalmente es válida para condiciones cercanas o similares donde se realiza la estimación (Tsakiris, 1982). Por lo tanto se requieren datos experimentales de diferentes ubicaciones y especies para formular modelos adecuados. En la actualidad, el cambio climático (CC) ha generado cambios en la temperatura máxima y mínima global, así como en el patrón de precipitación (disminución de la precipitación e irregular distribución); por lo que se ha incrementado la frecuencia de eventos climáticos extremos. Por consiguiente, se ratifica que para el cultivo de amaranto se requiere de la innovación de medidas de reducción del riesgo a la sequía que incluye el crecimiento de sistemas de riego sostenible, el seguimiento y la medición del abastecimiento de agua y sus usos por los cultivos, conjuntamente con la posibilidad de valorar nuevos recursos vegetales y nuevos procesos de producción (Spreeth, *et al.*, 2004).

Por lo tanto, para incrementar la superficie sembrada y el rendimiento por unidad de superficie en grano, se deberá desarrollar tecnología para la producción bajo distintos sistemas de producción, que van desde los convencionales hasta los sistemas modernos que implican la irrigación-fertilización. Esto ciertamente contribuirá a resolver los difíciles y complejos problemas que está atravesando la disponibilidad de alimentos para una creciente población en nuestro país. (Matteucci y Colma, 1997).

Con excepción de las zonas áridas, en el cultivo de amaranto, se sabe que la eficiencia en el uso del agua aumenta conforme se incrementa la densidad de plantas  $m^2$  y la dosis de nitrógeno (Díaz-Ortega *et al.*, 2004). Que la limitación de agua comparada con la restricción de macronutrientes tiene un efecto más enfático sobre la producción de materia fresca y seca total

(Ejjeji y Adeniran, 2010). Se reconoce también, que la incierta disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas constituye la limitante principal para la producción de granos y para la apertura de nuevas áreas de cultivo. Por lo tanto, para optimizar los recursos hídricos de un área de riego es importante conocer la cantidad de agua que consumen los cultivos a lo largo de sus diferentes fases fenológicas, a fin de suministrarla a través del riego en forma calendarizada, lo que permite reponer el agua consumida por la evapotranspiración. Es decir, que adquiere prerrogativa el desarrollar variedades de amaranto tolerantes a sequía/heladas/calor e instalar sistemas para el manejo del agua (captación), instalación de sistemas de riego eficiente y en lo sucesivo, tomar decisiones en el manejo del agua según información climática existente. Precisamente, en México, una de las causas por lo que este cultivo no ha incrementado su superficie sembrada y su producción, es por la falta de conocimiento de aquellos factores que influyen el crecimiento de la planta de amaranto y el rendimiento, a través del seguimiento de la acumulación de materia seca durante el tiempo (Gardner *et al.*, 1985) que permita el ajuste de manejo del cultivo, en términos de agua y nutrientes requeridos durante todo su ciclo de desarrollo y crecimiento (Russo, 2009).

Generalmente, el crecimiento se determina mediante medidas directas (altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas área foliar, masa seca) e indirectas como la tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo, tasa relativa de crecimiento, etc. Cada variedad tiene una respuesta diferente a las mismas condiciones agronómicas y ambientales (Pospisil *et al.*, 2006; Skwarylo-Bednarz y Krzepilko, 2008). El amaranto se encuentra en diversos ambientes, ya que puede adaptar su producción de biomasa y grano a un amplio rango de condiciones (Jacobsen y Sherwood, 2002).

En el contexto económico actual, el objetivo de las explotaciones agrícolas es la obtención del máximo rendimiento. Son reconocidas las ventajas que supone la fertirrigación localizada, ahorros de agua, fertilizantes, mano de obra, labores culturales, a la vez que se incrementa el rendimiento de los cultivos (mayor producción, calidad y precocidad de las cosechas). Un adecuado manejo de estos sistemas incide en una plena disponibilidad para que las raíces puedan obtener el agua y los nutrimentos esenciales para un crecimiento óptimo y armónico de acuerdo con el momento fenológico del cultivo. En consecuencia, para contribuir a desarrollar tecnología de producción en este cultivo, se planteó el objetivo de caracterizar la dinámica de crecimiento, acumulación y distribución de materia seca y eficiencia fisiológica de dos variedades de amaranto (*A. hypochondriacus* raza Mercado y *A. cruentus* raza Mexicana), bajo tres niveles de irrigación en invernadero con micro-irrigación, que permita determinar los indicadores fisiológicos y morfológicos que están relacionados con el rendimiento potencial en grano y forraje fresco.

#### **4.2. Materiales y métodos**

El experimento se realizó durante 2015 en el periodo de desarrollo otoño-invierno, en condiciones de invernadero, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados-Campus SLP, ubicadas en el municipio de Salinas de Hidalgo; cuyas coordenadas son 22°37'29.4"N 101°42'35.9"W y una altitud de 2070 msnm.

Dos variedades de *Amaranthus spp*: Frondosa (*A. hypochondriacus*) derivada de la raza Mercado y Dorada (*A. cruentus*) derivada de la raza Mexicana, fueron evaluadas en tres diferentes láminas de irrigación por planta: 150, 200 y 250 ml planta<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>. El diseño de tratamientos fue un factorial completo (3 x 2). Se utilizó un diseño experimental de parcelas



divididas en bloques completamente al azar, con cuatro repeticiones. La parcela grande estuvo constituida por las láminas de irrigación y la parcela chica por las variedades de amaranto.

Las plántulas de amaranto utilizadas se obtuvieron utilizando como sustrato peat moss. La siembra se realizó el 16 de agosto de 2015. Durante el período de germinación y emergencia se aplicaron riegos solamente con agua para mantener una humedad adecuada en el sustrato. Más del 50% de emergencia ocurrió a los 4 días después de la siembra. Posteriormente, al haber más del 50% de emergencia de plántulas, fueron regadas dos veces por día, durante 19 días, con una solución nutritiva (SN) ajustada a un pH de 5.3 y una conductividad eléctrica (CE) de 2.66 mS cm<sup>-1</sup>. La composición de la SN en ppm fue de N (65), P (19), K (96) y Ca (39). Posteriormente, cuatro días antes del trasplante, con la finalidad de preparar las plántulas nutrimentalmente al establecimiento del sitio definitivo, se incrementó el aporte de nutrimentos en N (97) y K (193), manteniendo la concentración de P y Ca.

Se trasplantó el 13 de septiembre de 2015, a los 24 días después de la emergencia (DDE), seleccionando aquellas plántulas que presentaban ocho hojas y una altura uniforme de 15 cm para Frondosa y seis hojas y 11 cm de altura para Dorada, las cuales se colocaron en un sustrato de material: fibra de coco, con medidas: 100 X 20 X 10 cm (“bolis”), el cual presentó un pH de 5.5 y CE de 3.3 mS cm<sup>-1</sup>, por lo tanto, antes de utilizarlo se lavó con agua corriente en varias ocasiones. En cada boli se colocaron cuatro plantas, con una separación de 25 cm entre cada una. Los bolis fueron puestos sobre el suelo del invernadero en hileras (5 bolis por hilera). Cada hilera correspondió a los factores de estudio (seis tratamientos) para su posterior evaluación en el invernadero. Para suministrar la solución nutritiva de cada volumen de agua, se empleó un sistema hidropónico de circuito cerrado, el cual regaba las plantas mediante riego por goteo con microtubos. Sus componentes consistieron en: un tanque de plástico con capacidad de 450 l,

tuberías de distribución de polietileno con un diámetro interno de 1.27 cm, microtubing de polietileno de diámetro interno 3 mm, goteros tipo estacas y una bomba de 0.5 HP.

El agua empleada en la fertigación de las plantas presentó un pH de 7.4 y una CE de 2.75 mS cm<sup>-1</sup>. Para cada tratamiento de volumen de agua (irrigación) se utilizó su propio tanque. La SN varió en cada etapa fenológica de crecimiento de amaranto y en los tres volúmenes tuvo la misma concentración de nutrimentos (en ppm) según la etapa de crecimiento. Al trasplante, se dio un periodo de acondicionamiento de 10 días, con el propósito de lograr el establecimiento en menor tiempo y fortalecer nutrimental la plántula de amaranto proveniente del almácigo. Se suministró una SN concentrada constituida de 273, 179, 268, 147 y 7 mg l<sup>-1</sup> (ppm) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg); respectivamente. Posteriormente, en la etapa vegetativa (10-29 DDT), la composición de SN en ppm fue N (150), P (48), y K (120), Ca (50), Mg (12) y Fe (5). Mientras que, en la etapa de floración, fructificación y hasta tres días antes de la cosecha (30-62 DDT) la composición de la SN fue de 200, 50, y 150, ppm de N, P, K, respectivamente. Es importante indicar que, a partir del periodo de crecimiento vegetativo, las cantidades Ca (50), Mg (12) y Fe (5) se mantuvieron durante todo el ciclo. Las SN se ajustaron a un pH ligeramente ácido (5.7) y la SN tuvo una CE similar (4.05 mS cm<sup>-1</sup>). Las fuentes de fertilizantes empleados en la preparación de SN fueron: Nitrato de Calcio, Nitrato de Potasio, Nitrato de Magnesio, Fosfonitrato, Ac. Fosfórico, Ac. Nítrico y Quelato de hierro y fueron previamente diluidos e incorporados al tanque de riego según el tratamiento de irrigación.

Con la finalidad de determinar las constantes térmicas en cada etapa fenológica, se registró la temperatura interna del invernadero. Con los datos obtenidos, mediante el método residual (Snyder, 1985) se calcularon los Días grado de crecimiento (DGC) (°C) con la siguiente fórmula:  $DGC = ((T_{máx} + T_{mín})/2) - T_B$  donde: DGC = Días grado de crecimiento, °C, T<sub>máx</sub> =

Temperatura máxima diurna, °C,  $T_{mín}$  = Temperatura mínima diurna, °C y TB = Temperatura base, considerada como 8 °C (Cristaudo *et al.*, 2007).

Para conocer el crecimiento y fenología del cultivo, a partir de los 21 DDT se realizó un muestreo por semana (21, 28, 35, 42, 49, 56 y 62 DDT), resultando un total de cinco muestreos más la cosecha en diferentes días para cada variedad. Durante el ciclo del experimento se hicieron diversas mediciones de variables en diferentes etapas fenológicas: vegetativa (21 y 28 DDT), inicio de floración (35 DDT), formación de grano (42 DDT) y madurez fisiológica (56 y 62 DDT según variedad). Los dos últimos muestreos correspondieron a la cosecha, ocurriendo primero en la variedad Dorada y después en la Frondosa, debido a que presentaron la madurez fisiológica en diferentes momentos.

Los muestreos se realizaron en plantas con competencia completa, estos fueron destructivos. Las variables medidas altura de planta, número de hojas, longitud de panoja, diámetro de tallo, peso fresco y seco en sus diferentes estructuras (raíz, hoja, tallo, panoja y grano) se evaluaron con la finalidad de obtener datos cuantitativos, básicos y directos que permitieran un análisis agronómico, además algunos de los datos colectados sirvieron para calcular los índices de crecimiento que se mencionan más adelante.

Con el fin de aportar un mayor conocimiento en esta especie a partir de las medidas directas, materia seca y área foliar, se determinaron algunos componentes fisiológicos y morfológicos mediante el empleo del método clásico, basado en las fórmulas para valores promedios propuestos por Watson (1952), Yoshida (1972) y Hunt (1990). Los índices de crecimiento calculados se muestran en el Cuadro 19.

**Cuadro 19.** Índices de crecimiento empleados en fisiología vegetal y de cultivos, adaptado de Hunt, 1978 y Gardner *et al.*, 1985.

Índice de Crecimiento	Símbolo	Valor instantáneo	Valor promedio de un intervalo de tiempo (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )	Unidades
Tasa absoluta de crecimiento	TAC	$\frac{dw}{dt}$	$TAC = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$	g/día
Tasa de asimilación neta	TAN	$\frac{1}{AF} \frac{dw}{dt}$	$TAN = \frac{\frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}}{\frac{(LnAF_2 - LnAF_1)}{(AF_2 - AF_1)}}$	g/(cm <sup>2</sup> día)
Tasa relativa de crecimiento	TRC	$\frac{1}{W} \frac{dw}{dt}$	$TCR = \frac{(Ln W_2 - Ln W_1)}{T_2 - T_1}$	g/(g día)
Área foliar específica	AFE	$\frac{AF}{MF}$	$AFE = \frac{\frac{AF_2 + AF_1}{2}}{\frac{W_2 + W_1}{2}}$	cm <sup>2</sup> /g
Razón de área foliar	RAF	-	$RAF = \frac{\frac{AF_1}{PS_1} + \frac{AF_2}{PS_2}}{2}$	cm <sup>2</sup> /g
Razón de peso foliar	RPF	-	$RPF = \frac{PSF}{PS}$	g/g

Finalmente, las dos variedades fueron contrastadas por algunas características a la madurez fisiológica (MF), tales como el rendimiento de follaje y peso de panoja y grano en seco. A la cosecha, también se determinó el índice de cosecha (IC= Rendimiento de semilla/Biomasa total) \*100) (Reinaudi *et al.* 2011), el rendimiento de grano (g y t ha<sup>-1</sup>), y componentes del mismo como número de granos g<sup>-1</sup>.

La respuesta de las dos variedades en su productividad, fue soportada estadísticamente mediante un análisis de varianza de acuerdo al diseño experimental seleccionado, posteriormente se realizaron pruebas de medias mediante el procedimiento de Tukey. Para efectuar las operaciones de cálculo, se empleó el paquete computacional SAS (2010). Asimismo, se elaboraron curvas de crecimiento mediante los programas Curve Expert 1.4 y Excel (Microsoft Excel).

### 4.3. Resultados y discusión

La temperatura: para la mayoría de las plantas el rango normal de temperatura favorable al crecimiento oscila entre 15 y 40 grados centígrados. Temperaturas mayores o menores que éstas afecta negativamente la tasa de crecimiento y la fotosíntesis se afectan. El efecto de la temperatura sobre las plantas varía con cada especie. Por tanto, la variable climática temperatura tiene impacto sobre el rendimiento de los cultivos. Con respecto al cultivo de amaranto, al igual que otros cultivos, éste es sensible a la temperatura y cada especie o variedad posee en cualquier etapa fenológica de su ciclo una temperatura mínima debajo de la cual no crece, una temperatura óptima en la que crece a una tasa máxima y una temperatura máxima a la cual no crecerá (Salisbury y Ross, 1994). En el Cuadro 20 se presentan los valores de las temperaturas máxima, media y mínima registradas durante el periodo en que se desarrolló el experimento, dentro del invernadero.

**Cuadro 20.** Temperaturas, máxima, media y mínima registradas dentro del invernadero durante el ciclo del cultivo de amaranto.

Meses	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
			°C		
T max	31.2	29.9	27.4	28.0	24.9
T media	24.0	23.5	21.5	20.6	16.4
Tmin	16.8	17.2	15.5	13.2	7.8

En cuanto al comportamiento de los tratamientos, las láminas de riego no se vieron influenciadas por la temperatura; en cambio en las variedades, en algunas etapas fenológicas se observó efecto como se mostrará más adelante en los Días grado de crecimiento (DGC).

Durante el periodo de crecimiento del amaranto (agosto-diciembre) la temperatura promedio máxima fue de 31.2 °C (agosto) y la mínima de 7.8 °C (diciembre) en el interior del invernadero. La temperatura mínima fluctuó entre 7.8 y 17.2 °C; mientras que, la máxima osciló entre los 24.9 y 31.2 °C. Al final del ciclo del cultivo (mes de diciembre) tanto la temperatura máxima (24.9 °C) y la mínima (7.8 °C) fueron reduciéndose. Es importante señalar que la temperatura media durante el desarrollo del cultivo de amaranto dentro del invernadero fluctuó entre 24.0 y 16.4 °C, en el mes de agosto y mes de diciembre; respectivamente. Estos últimos valores coinciden con el rango optimo reportado por Cristaudo *et al.*, (2007) para el desarrollo apropiado del cultivo de amaranto.

Asimismo, Cristaudo *et al.*, (2007) señalan que la temperatura mínima para el crecimiento del cultivo del amaranto se encuentra por arriba de los 8 °C y la máxima está en los 35 °C. No obstante, que las temperaturas reportadas por estos investigadores son adecuadas para el amaranto, esta condición ocasionó diferencias en el desarrollo de las dos variedades de cultivo de amaranto, permitiendo que este a su vez afectara el menor o mayor rendimiento en biomasa fresca producida, aspecto que será analizado más adelante.

### 4.3.1. Altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de panoja

Las respuestas de todas las variables descritas a continuación se muestran por efecto de lámina de riego y de variedad, debido a que no se presentó efecto de interacción entre éstos dos tratamientos.

#### 4.3.1.1. Efecto de lámina de riego

El efecto de suministro de agua y nutrientes, es un aspecto importante en estudios en los cultivos, debido a que se encuentra directamente relacionado con eventos fisiológicos que afectan la producción y acumulación de materia seca entre los diferentes órganos (Rodríguez, 2000). En esta investigación, la altura de planta y el diámetro de tallo, se vieron afectados significativamente durante todo el ciclo del cultivo, por el factor de estudio, láminas de irrigación (Cuadro 21).

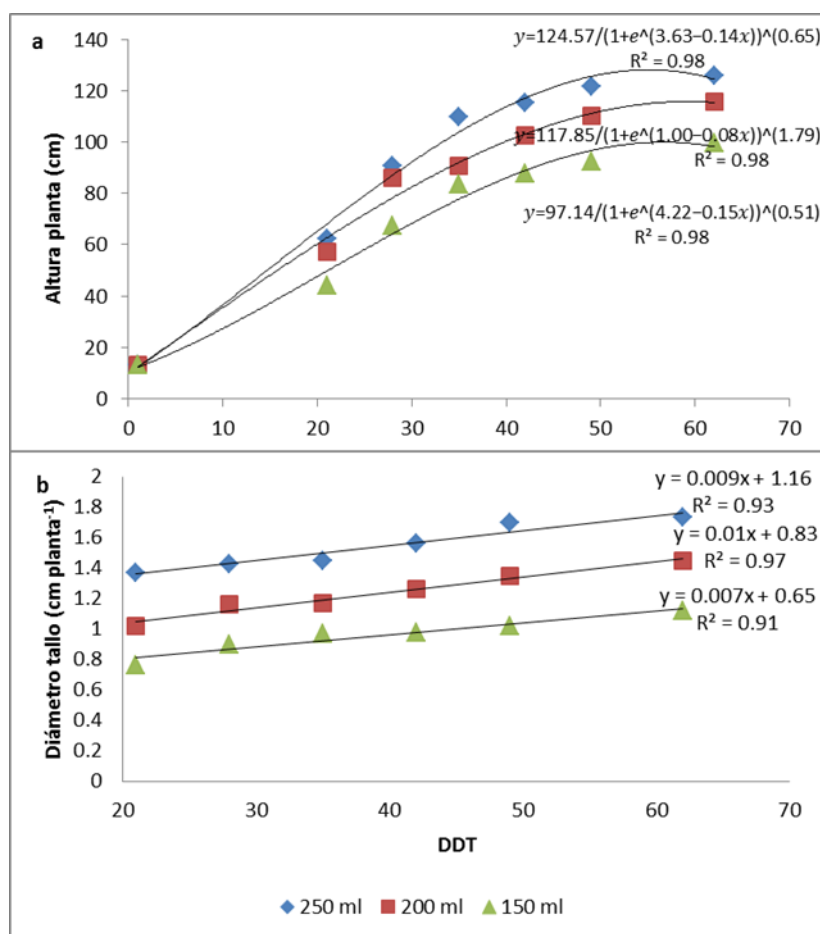
**Cuadro 21.** Efecto de las láminas de irrigación sobre la altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de panoja del cultivo de amaranto.

Lámina de riego (ml)	DDT					
	21	28	35	42	49	62
	<b>Altura de planta (cm)</b>					
150	44.06 <sup>b</sup>	67.50 <sup>b</sup>	83.62 <sup>b</sup>	87.56 <sup>b</sup>	92.50 <sup>b</sup>	99.50 <sup>b</sup>
200	57.25 <sup>a</sup>	85.87 <sup>a</sup>	90.68 <sup>a</sup>	102.37 <sup>ab</sup>	110.06 <sup>a</sup>	115.9 <sup>ab</sup>
250	62.18 <sup>a</sup>	90.87 <sup>a</sup>	109.56 <sup>a</sup>	115.18 <sup>a</sup>	121.81 <sup>a</sup>	125.8 <sup>a</sup>
	<b>Longitud de panoja (cm)</b>					
150	5.06 <sup>a</sup>	15.50 <sup>a</sup>	18.00 <sup>a</sup>	25.18 <sup>a</sup>	26.0 <sup>b</sup>	28.50 <sup>b</sup>
200	7.31 <sup>a</sup>	18.25 <sup>a</sup>	20.56 <sup>a</sup>	28.31 <sup>a</sup>	32.0 <sup>ab</sup>	32.81 <sup>ab</sup>
250	7.41 <sup>a</sup>	19.81 <sup>a</sup>	22.81 <sup>a</sup>	30.62 <sup>a</sup>	36.8 <sup>a</sup>	38.37 <sup>a</sup>
	<b>Diámetro de tallo (cm)</b>					
150	0.76 <sup>b</sup>	0.90 <sup>c</sup>	0.97 <sup>b</sup>	0.98 <sup>b</sup>	1.02 <sup>c</sup>	1.12 <sup>b</sup>
200	1.02 <sup>b</sup>	1.16 <sup>b</sup>	1.17 <sup>b</sup>	1.26 <sup>ab</sup>	1.35 <sup>b</sup>	1.45 <sup>ab</sup>
250	1.37 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	1.45 <sup>a</sup>	1.56 <sup>a</sup>	1.70 <sup>a</sup>	1.73 <sup>a</sup>
	<b>Número de hojas por planta</b>					
150	19.00 <sup>a</sup>	42.50 <sup>a</sup>	51.50 <sup>a</sup>	55.75 <sup>b</sup>	58.08 <sup>b</sup>	55.75 <sup>a</sup>

200	18.25 <sup>a</sup>	43.50 <sup>a</sup>	52.25 <sup>a</sup>	64.00 <sup>b</sup>	69.50 <sup>ab</sup>	67.50 <sup>a</sup>
250	18.75 <sup>a</sup>	52.50 <sup>a</sup>	63.50 <sup>a</sup>	90.00 <sup>a</sup>	99.75 <sup>a</sup>	83.25 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

Las mayores diferencias resultaron entre la aplicación de 250 y 150 ml planta<sup>-1</sup>. La altura final alcanzada por la planta de amaranto a los 62 DDT, fue de 125.8 y 99.5 cm; respectivamente. El comportamiento diferencial observado en altura de planta pone de manifiesto que el amaranto responde morfológica y fisiológicamente a los tratamientos de irrigación evaluados. En la Figura 8a se observa un crecimiento sigmoideal en altura de los tres tratamientos de irrigación, los cuales son descritos mediante la fórmula de Richards con un ajuste de  $R^2$  de 0.98, describe una máxima altura al final del ciclo.





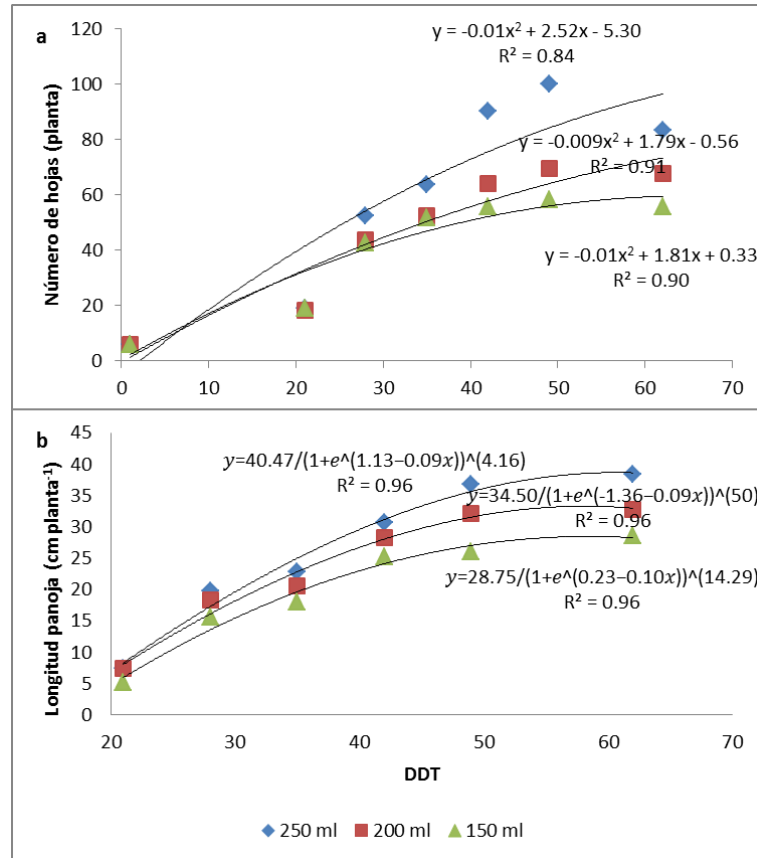
**Figura 8.** Altura de planta (cm) (a) y diámetro de tallo (cm planta<sup>-1</sup>) (b) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a tres láminas de irrigación (250, 200 y 150 ml).

El diámetro de tallo resultó afectado durante todo el ciclo del cultivo de amaranto por los tratamientos de irrigación ( $P < 0.05$ ). Consistentemente con el tratamiento de 250 ml planta<sup>-1</sup> se obtuvieron los mayores ( $P < 0.05$ ) diámetros de tallos con respecto al tratamiento 150 ml planta<sup>-1</sup>. El diámetro de tallo determinado al final de ciclo, entre estas dos láminas de riego, fueron de 1.73 y 1.12 cm respectivamente. Las ecuaciones de regresión para altura (Figura 8 a) bajo los tres tratamientos de irrigación presentan valores de  $R^2$  de 0.98. En cambio, para diámetro de tallo las  $R^2$  de ajuste estuvieron en el rango de  $R^2$  0.91-0.97 (Figura 8 b).

Con respecto, al número de hojas por planta sólo hubo diferencias ( $P < 0.05$ ) entre las láminas de riego, a los 42 y 49 DDT; a los 42 DDT se tuvieron 58.1 hojas para el tratamiento de 150 ml y 90.0 hojas para el tratamiento de 250 ml, mientras que a los 49 DDT el número de hojas fue de 55.7 y 99.8 para los tratamientos de 150 y 250 ml, respectivamente.

En cuanto a la longitud de panoja las diferencias significativas ocurrieron a los 49 y 62 DDT con 36.8 y 38.7 cm, respectivamente en la lámina de riego correspondiente a 250 ml planta<sup>-1</sup> y 26.0 y 28.5 cm de longitud de la panoja en el tratamiento de 150 ml planta<sup>-1</sup>. Además, precisamente con el tratamiento de irrigación de 250 ml planta<sup>-1</sup>, las máximas tasas de aparición de hojas fueron de 4.82 y 3.78 hojas semana<sup>-1</sup> durante los periodos de 21-28 y 35-42 DDT respectivamente. Muy superiores a las tasas que se observaron con el tratamiento de 150 ml planta<sup>-1</sup> (3.35y 0.6 hojas semana<sup>-1</sup>), durante el mismo periodo. Con base en esta información es de esperarse que los rendimientos de materia fresca y seca, algunos componentes de rendimiento se vean favorecidos por el tratamiento de irrigación de 250 ml planta<sup>-1</sup>, como más adelante se analizarán. Gráficamente, en la Figura 9a y 9b, se presenta el número de hojas y longitud de

panoja observadas durante todo el ciclo del cultivo del amaranto, al aplicarse distintas láminas de riego respectivamente. Las ecuaciones de regresión para el número de hojas bajo los tres tratamientos de irrigación presentan valores de  $R^2$  entre 0.96 y 0.98.



**Figura 9.** Número de hojas (planta) (a) y longitud de panoja (cm planta<sup>-1</sup>) (b) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a tres láminas de irrigación (250, 200 y 150 ml).

#### 4.3.1.2. Respuesta de variedades de amaranto

Con referencia al comportamiento de las variedades de amaranto estudiados, sólo la variable correspondiente al número de hojas por planta resultó significativamente más alta en la variedad Frondosa a los 21, 28 y 35 DDT (21, 50 y 64 hojas planta<sup>-1</sup>) con respecto a la variedad Dorada, la cual reportó valores de 16, 42 y 47 hojas planta<sup>-1</sup> durante el mismo periodo (Cuadro

22). A los 49 DDT se presentó el mayor número de hojas y al final del ciclo el número de hojas planta<sup>-1</sup> en las dos variedades resultaron iguales (69). El mayor número de hojas en Dorada y Frondosa, se encuentran dentro de lo reportado por Reinaudi *et al.* (2011) en *A. cruentus* (20-64 hojas y 24-109 hojas, respectivamente) y en *A. hypochondriacus* (24-101 hojas y 24-167 hojas, respectivamente); a la floración y en formación de grano.

De igual forma coinciden en la dinámica, presentando el mayor número de hojas en ambas variedades, durante la formación de grano y decreciendo al final del ciclo debido a la madurez fisiológica. Resulta también explicativo señalar que, para la variedad Frondosa las máximas tasas de aparición de hojas fueron de 4.14 y 2.0 hojas semana<sup>-1</sup> durante los periodos de 21-28 y 35-42 DDT; respectivamente. Muy superiores a las tasas que se observaron en la variedad Dorada (3.71 y 0.7 hojas semana<sup>-1</sup>), durante el mismo periodo.

**Cuadro 22.** Altura de planta (cm), diámetro de tallo (cm), número de hojas (planta<sup>-1</sup>) y longitud de panoja (cm) determinada en las dos variedades de amaranto a distintos días después del trasplante (DDT).

Cultivar	DDT						
	21	28	35	42	49	56*	62*
	<b>Altura de planta (cm)</b>						
<b>Dorada</b>	46.6 <sup>b</sup>	80.41 <sup>a</sup>	89.75 <sup>a</sup>	101.12 <sup>a</sup>	104.91 <sup>a</sup>	110.79 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	62.0 <sup>a</sup>	82.41 <sup>a</sup>	99.50 <sup>a</sup>	102.29 <sup>a</sup>	111.33 <sup>a</sup>	---	116.62 <sup>a</sup>
	<b>Longitud de panoja (cm)</b>						
<b>Dorada</b>	7.52 <sup>a</sup>	17.83 <sup>a</sup>	20.33 <sup>a</sup>	29.00 <sup>a</sup>	30.83 <sup>a</sup>	32.95 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	5.66 <sup>a</sup>	17.87 <sup>a</sup>	20.58 <sup>a</sup>	27.08 <sup>a</sup>	32.41 <sup>a</sup>	---	33.50 <sup>a</sup>
	<b>Diámetro de tallo (cm)</b>						
<b>Dorada</b>	0.97 <sup>a</sup>	1.15 <sup>a</sup>	1.20 <sup>a</sup>	1.29 <sup>a</sup>	1.37 <sup>a</sup>	1.44 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	1.13 <sup>a</sup>	1.17 <sup>a</sup>	1.19 <sup>a</sup>	1.25 <sup>a</sup>	1.34 <sup>a</sup>	---	1.43 <sup>a</sup>
	<b>Número de hojas planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	16 <sup>b</sup>	42 <sup>b</sup>	47 <sup>b</sup>	64 <sup>a</sup>	72 <sup>a</sup>	69 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	21 <sup>a</sup>	50 <sup>a</sup>	64 <sup>a</sup>	76 <sup>a</sup>	80 <sup>a</sup>	---	69 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

\* Madurez fisiológica.

En cuanto a las diferencias significativas encontradas en altura de planta entre las dos variedades, Frondosa superó (62.0 cm) a la Dorada (46.6), sólo a los 21 DDT. La altura final no resultó diferente significativamente entre las dos variedades (116.62 vs 110.7 cm). La altura alcanzada al final del ciclo, en esta investigación, fue inferior a lo reportada en condiciones de campo por Torres *et al.* (2006) en Frondosa (152-158 cm), así como también con aquellas reportadas por Reinaudi *et al.* (2011) en diferentes variedades de *A. cruentus* (132-204 cm) y *A. hypochondriacus* (140-209 cm).

Las dos variedades no mostraron diferencia significativa en altura, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de la panoja al final del ciclo. Los valores de diámetro de tallo en la variedad Frondosa obtuvieron un valor de 1.43 cm y la Dorada 1.44 cm. Ambos valores dentro del rango reportado por Torres *et al.* (2006) (1.39-1.59 cm) y García- Pereyra *et al.* (2004) que oscilan entre 1.5 y 3.1 cm.

#### **4.3.2. Producción de materia fresca**

En esta investigación, la producción de biomasa fresca se vio afectada significativamente durante todo el ciclo del cultivo por la aplicación de las diferentes láminas de riego. Las variedades de amaranto mostraron también diferencias significativas solamente a los 21 y 49 DDT de crecimiento (Cuadro 23). Consistentemente los rendimientos de biomasa fresca fueron superiores ( $P < 0.05$ ) cuando la lámina de irrigación correspondió a la aplicación de  $250 \text{ ml planta}^{-1}$ , con respecto a los obtenidos con los tratamientos de  $200$  y  $150 \text{ ml planta}^{-1}$ . Los rendimientos de biomasa verde más altos se obtuvieron a los 62 DDT, con valores de 607, 335 y  $215.8 \text{ g planta}^{-1}$  pertenecientes a las láminas de riego, en el orden anteriormente mencionado. Al

considerar una densidad de población de 25 planta m<sup>-2</sup>, estos rendimientos por planta, significarían la obtención de 151.75, 83.75 y 53.95 t ha<sup>-1</sup>; respectivamente. La eficiencia en el uso del agua (EUA), considerando las láminas de riego aplicada, los valores de EUA fueron 469.8, 316.0 y 259.3 kg m<sup>-3</sup> para 250, 200 y 150 ml planta<sup>-1</sup>; respectivamente.

**Cuadro 23.** Valores de materia fresca (g planta<sup>-1</sup>) obtenidos por tratamiento de irrigación (150, 200 y 250 ml planta<sup>-1</sup>) y variedades de amaranto (Dorada y Frondosa) en distintos días después del trasplante (DDT).

Lámina de irrigación (ml planta <sup>-1</sup> )	DDT						
	21	28	35	42	49	62	
	Materia fresca por planta						
150	48.17 <sup>c</sup>	82.8 <sup>c</sup>	122.5 <sup>c</sup>	158.3 <sup>b</sup>	172.8 <sup>c</sup>	215.8 <sup>c</sup>	
200	110.0 <sup>b</sup>	155.8 <sup>b</sup>	185.3 <sup>b</sup>	246.4 <sup>b</sup>	303.4 <sup>b</sup>	335.1 <sup>b</sup>	
250	164.6 <sup>a</sup>	239.2 <sup>a</sup>	293.10 <sup>a</sup>	480.3 <sup>a</sup>	519.9 <sup>a</sup>	607.0 <sup>a</sup>	
Variedad	DDT						
	21	28	35	42	49	56 <sup>*</sup>	62 <sup>*</sup>
Dorada	88.7 <sup>b</sup>	169.6 <sup>a</sup>	194.9 <sup>a</sup>	305.8 <sup>a</sup>	357.3 <sup>a</sup>	414.2 <sup>a</sup>	---
Frondosa	126.5 <sup>a</sup>	148.9 <sup>a</sup>	205.7 <sup>a</sup>	284.1 <sup>a</sup>	306.7 <sup>b</sup>	---	357.7 <sup>a</sup>

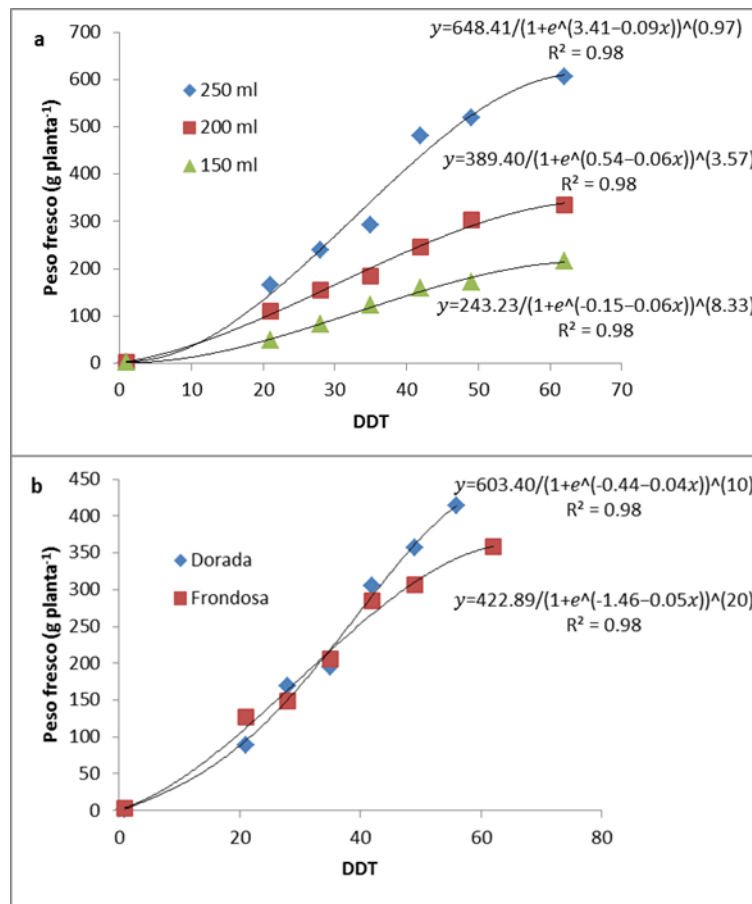
Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (Tukey P<0.05).

\* Madurez fisiológica.

Igualmente, la producción de materia fresca con un 80% de humedad (Cuadro 23) al momento de la cosecha, la variedad de amaranto Dorada produjo un rendimiento medio de 414.2 g planta<sup>-1</sup>(56 DDT) mientras que la variedad Frondosa (357.7 g planta<sup>-1</sup>), a los 62 DDT. Estos valores expresan rendimientos de 103.53 y 89.425 t ha<sup>-1</sup>, al considerar una densidad de población de 25 plantas m<sup>-2</sup>; respectivamente.

García- Pereyra *et al.* (2004), reportan en un ciclo primavera-verano, valores inferiores a los obtenidos en este estudio. Sus rendimientos promedios (con una densidad de 125,000 plantas ha<sup>-1</sup>) reportados fueron de 80.61 y 72.50 t ha<sup>-1</sup> para *A. cruentus*; y *A. hypochondriacus*; respectivamente. En referencia a la eficiencia en el uso del agua (EUA), en esta investigación y

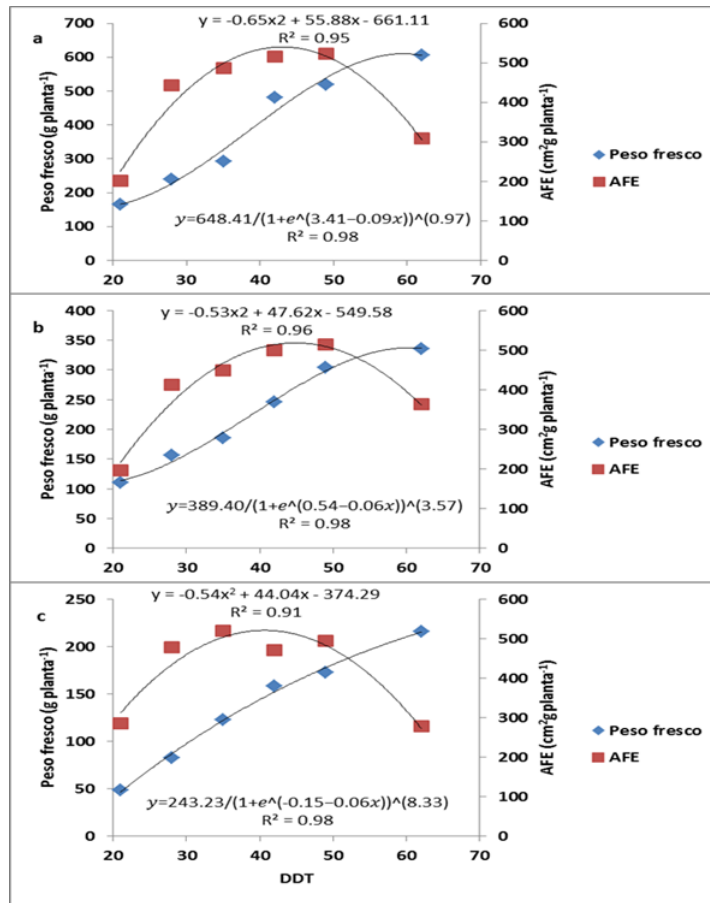
considerando la lámina de riego (250 ml planta<sup>-1</sup>) más alta aplicada que se cuantificó de 323 mm al final del ciclo, la producción de biomasa fresca fue mayor en la variedad Dorada (249.6 kg mm<sup>-1</sup>) con respecto a Frondosa (224.5 kg mm<sup>-1</sup>). Gráficamente se presentan los rendimientos de materia fresca (g planta<sup>-1</sup>) obtenidos tanto como respuesta a las tres láminas de riego, como también aquellos cuantificados en las dos variedades de amaranto, Frondosa y Dorada estudiadas. Para los dos factores en estudio: láminas de riego y variedades de amaranto; las ecuaciones de regresión para la variable de producción de materia fresca, presentaron valores de R<sup>2</sup> de ajuste del 0.98, (Figura 10).



**Figura 10.** Materia fresca (g planta<sup>-1</sup>) a diferentes días después del trasplante (DDT) del amaranto, en respuesta a las tres láminas de irrigación (a) y dos variedades de amaranto (b) estudiadas.

Un aspecto importante es evaluar la calidad de un forraje, para ello puede utilizarse el área foliar específica (AFE). El AFE es el área media de las hojas por unidad de peso de hojas. Es una medida del espesor de las hojas, con valores altos para las hojas poco gruesas que poseen muchos centímetros cuadrados de área por unidad de peso. Las hojas con baja AFE tienen alta correlación con mayor lignificación, bajo contenido de humedad y baja concentración de N (Castro *et al.*, 2000). Esta variable es afectada por condiciones ambientales como la intensidad lumínica y la época del año (Lee y Heuvelink, 2003).

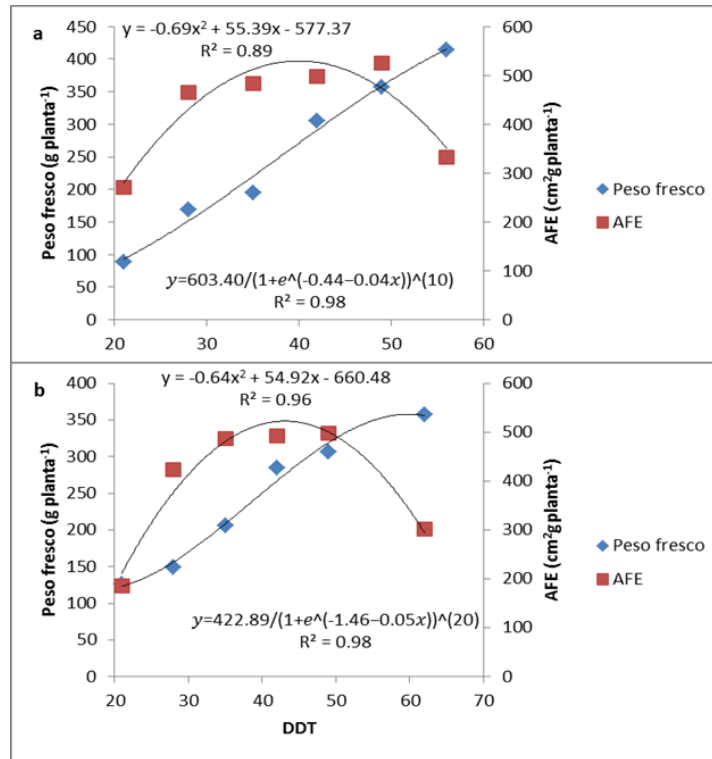
En esta investigación no hubo diferencias significativas entre tratamientos de irrigación para esta variable AFE. Un valor medio mínimo (227.8) a los 21 DDT y máximo (510) a los 49 DDT de AFE ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \text{planta}^{-1}$ ) fue obtenido. Gráficamente en la Figura 11 se aprecia el grado de asociación entre producción de biomasa fresca y AFE por planta en los tratamientos de irrigación donde se observa que entre los 50-56 DDT es el mejor momento de cosecha para forraje.



**Figura 11.** Materia fresca (g planta<sup>-1</sup>) y área foliar específica (AFE cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup>) en diferentes días después del trasplante (DDT) en respuesta a las láminas de irrigación: 250 ml (a), 200 ml (b) y 150 ml (c).

En el caso de las variedades (Figura 12), considerando la mayor producción de biomasa fresca estimada mediante ecuación de Richards y el AFE, se observa que el mejor momento de cosecha del amaranto para forraje ocurre entre los 45 – 51 DDT para Dorada y entre los 50 – 56 DDT para Frondosa. Lo anterior considerando que la mejor calidad del amaranto para forraje se tiene al momento que logra la mayor AFE, debido a que a mayor AFE se incrementa la calidad del forraje (Lusk, 2002). Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Abbasi *et al.* (2012) quienes encontraron que durante el llenado de grano de amaranto es el mejor momento para obtener la mayor cantidad y calidad de forraje.





**Figura 12.** Materia fresca ( $\text{g planta}^{-1}$ ) y área foliar específica (AFE  $\text{cm}^2 \text{g planta}^{-1}$ ) en diferentes días después del trasplante (DDT) en respuesta a las variedades estudiadas: Dorada (a) y Frondosa (b).

### 4.3.3. Área foliar (AF)

El área foliar es un parámetro ampliamente utilizado en estudios de ecofisiología de cultivos, imprescindible en la caracterización del crecimiento y desarrollo vegetativo, así como en el estudio del efecto que las diferentes técnicas agronómicas (programación del riego, fertilización etc.) tienen sobre el comportamiento de un cultivo: por esta razón, esta variable se emplea en la modelización de muchos procesos en los que está involucrada la planta, tales como la evapotranspiración, fotosíntesis, crecimiento, rendimiento, agua o nutrientes en el continuo

suelo-planta-atmosfera, eficiencia en el uso del agua o de la radiación fotosintéticamente activa, entre otros (Coombs y Hall, 1982).

En esta investigación, los tratamientos de las tres láminas de irrigación, afectaron significativamente el AF de la planta de amaranto durante todo el ciclo del cultivo (Cuadro 24). Las mayores diferencias significativas, según el análisis de varianza, resultaron entre los tratamientos correspondientes a 250 y 150 ml planta<sup>-1</sup>. Cuando se adicionó 250 ml planta<sup>-1</sup>, el AF inicial fue de 0.14 m<sup>2</sup> a los 21 DDT, ascendiendo ésta de manera progresiva en tiempo hasta 1.07 m<sup>2</sup> a los 49 DDT, para enseguida disminuir a 0.66 m<sup>2</sup> a los 62 DDT. Mientras que con el tratamiento de 150 ml planta<sup>-1</sup> el AF de la planta de amaranto inició con 0.06 m<sup>2</sup>, ascendió a 0.35 m<sup>2</sup> y disminuyó a 0.24 m<sup>2</sup>, a los 21, 49 y 62 DDT, respectivamente.

**Cuadro 24.** Valores de área foliar (AF) obtenidos por tratamiento de irrigación y variedades de amaranto en distintos días después del trasplante (DDT).

Lámina de irrigación (ml planta <sup>-1</sup> )	DDT						
	21	28	35	42	49	62	
	Área foliar (m <sup>2</sup> )						
150	0.06 <sup>c</sup>	0.16 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>	0.28 <sup>c</sup>	0.35 <sup>bc</sup>	0.24 <sup>b</sup>	
200	0.09 <sup>b</sup>	0.26 <sup>ab</sup>	0.36 <sup>ab</sup>	0.46 <sup>b</sup>	0.56 <sup>b</sup>	0.47 <sup>a</sup>	
250	0.14 <sup>a</sup>	0.40 <sup>a</sup>	0.50 <sup>a</sup>	0.82 <sup>a</sup>	1.07 <sup>a</sup>	0.66 <sup>a</sup>	
Variedad	DDT						
	21	28	35	42	49	56*	62*
	Dorada	0.09 <sup>a</sup>	0.29 <sup>a</sup>	0.36 <sup>a</sup>	0.53 <sup>a</sup>	0.69 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>
Froncosa	0.10 <sup>a</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	---	0.38 <sup>b</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

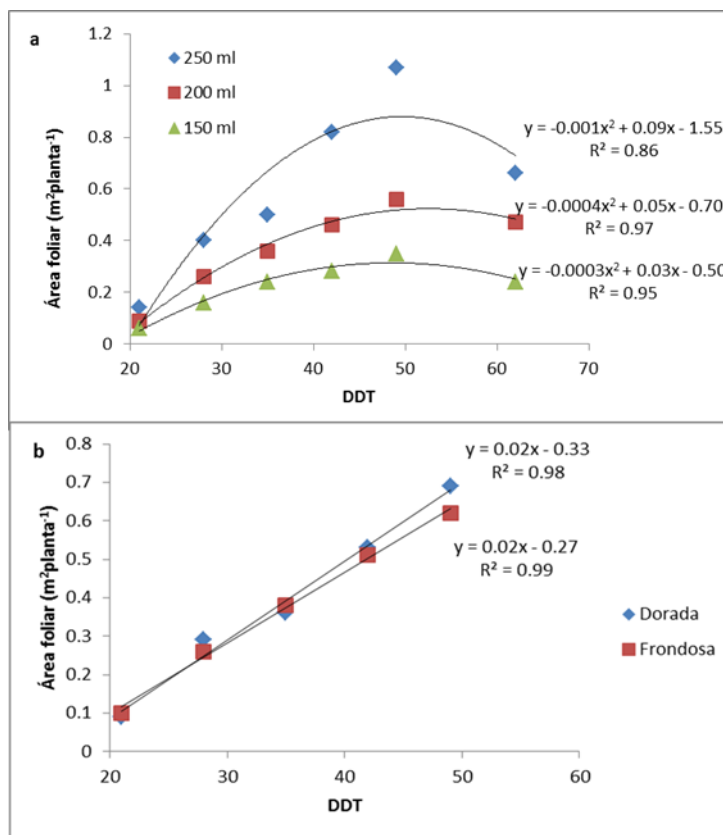
\* Madurez fisiológica.

Valores medios, pero significativamente menores fueron cuantificados bajo el tratamiento de 200 ml planta<sup>-1</sup> con respecto al de 250 ml planta<sup>-1</sup>, a los 21, 42 y 49 DDT donde se determinaron valores de 0.09, 0.46 y 0.56 m<sup>2</sup>; respectivamente. Los mayores valores de área foliar obtenidos sugieren una mayor actividad fotosintética laminar, ya que el comportamiento de respuesta de la materia fresca y en consecuencia la producción de materia seca a incrementos de la lámina de riego depende en gran medida del área foliar (Rodríguez, 2000). Las plantas con mayor AF y ambiente favorable, son capaces de utilizar mejor la energía solar con una fotosíntesis más eficiente.

A la madurez fisiológica según la variedad, el área media de la hoja (m<sup>2</sup>), de *A. cruentus*, variedad Dorada (0.54 m<sup>2</sup>) y *A. hypochondriacus* variedad Froncosa (0.38 m<sup>2</sup>), resultaron diferentes significativamente; a los 56 y 62 DDT; respectivamente. Mapes *et al.* (1995) reportan al final del ciclo para la raza Mercado de la cual deriva Froncosa una AF similar de 0.40 m<sup>2</sup> y en la raza Mexicana de la que deriva Dorada, una AF inferior de sólo 0.06 m<sup>2</sup> con respecto a la obtenida en el estudio. En ambas variedades se observó un incrementó del AF en forma lineal

durante todo ciclo, lo cual coincide con lo encontrado por Mapes *et al.* (1995). En nuestro estudio la variedad Dorada, inició con  $0.09 \text{ m}^2 \text{ hoja}^{-1}$  (21 DDT) y alcanzó su máxima AF ( $0.69 \text{ m}^2 \text{ hoja}^{-1}$ ) a los 49 DDT. Por su parte el *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, inició a los 21 DDT con  $0.10 \text{ m}^2 \text{ hoja}^{-1}$  y su máxima AF fue  $0.62 \text{ m}^2 \text{ hoja}^{-1}$  también hasta los 49 DDT (Cuadro 24). Los valores máximos de AF corresponden a la etapa de formación de grano, lo cual influyó como se muestra más adelante en la asignación de biomasa en las estructuras vegetativas de cada variedad.

En los tratamientos de láminas de irrigación y variedades de amaranto Dorada y Frondosa estudiadas, consistentemente el mayor valor de AF se presentó a los 49 DDT (Figura 13). La variable AF coincide con el mayor número de hojas por planta (Cuadros 21 y 22). En la Figura 13, gráficamente se expresa este comportamiento observado en AF, utilizando valores medios de esta medición y mostrando las ecuaciones de ajuste correspondientes a los tratamientos de láminas de irrigación ( $R^2$  de 0.86-0.97) y variedades de amaranto ( $R^2$  0.95-0.99). La información obtenida demuestra que el AF es un parámetro biológico imprescindible en la caracterización de procesos como el crecimiento y desarrollo vegetativo, cuando se evalúa la respuesta del cultivo de amaranto al efecto de diferentes técnicas de cultivo (manejo, programación de riego, fertilización etc.) sobre el comportamiento agronómico de la plantación, demostrando su importancia para valorar el potencial productivo del cultivo de amaranto (Gallagher y Biscoe, 1978). Una mejor altura, un mayor número de hojas por planta y un AF, sin restricciones de humedad en su medio de desarrollo, resulta una situación favorable para un mejor crecimiento y desarrollo de la planta de amaranto, lo cual contribuye a obtener mayores rendimientos. El análisis de los componentes de rendimiento se analizará más adelante.



**Figura 13.** Área foliar (AF) (m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>) determinada a días después de trasplante (DDT), en respuesta a las tres láminas de irrigación (a) y variedades de amaranto (b) estudiadas.

En el presente estudio se observó una disminución en el tiempo de desarrollo de ambas variedades, con respecto a lo reportado por Rivelli *et al.*, (2008). Sus ciclos fueron de 84 DDS y 90 DDS para Dorada y Frondosa; respectivamente. Esta reducción de días se atribuye a la mayor acumulación de días grado de crecimiento (DGC °C), en condiciones de invernadero y a la nutrición mineral. El concepto de DGC °C es aplicado para seleccionar variedades de cultivos en zonas agrícolas; dado que se conoce que la fenología y el desarrollo de la mayoría de los cultivos están relacionados con el tiempo transcurrido desde la fecha de trasplante o siembra. Cada especie tiene un número definido de DGC °C requerido para alcanzar su madurez fisiológica. En este estudio, los tratamientos de irrigación y variedades presentaron las mayores tasas de

aparición de hojas e incremento de AF en la etapa vegetativa (28 DDT o 53 días después de emergencia), lo que coincidió con los mayores GDC acumulados durante este periodo, siendo de 893.4 GDC °C, mismos que representan el 72.06 % y el 67.9% de unidades calor del total para la variedad Dorada y Frondosa; respectivamente (Cuadro 25).

**Cuadro 25.** Grados días de crecimiento (GDC °C) requeridos por las variedades de amaranto Dorada y Frondosa en cada etapa fenológica.

Etapa	Duración etapa				Duración acumulada			
	Dorada		Frondosa		Dorada		Frondosa	
	Días	Σ °GDC	Días	Σ °GDC	Días	Σ °GDC	Días	Σ °GDC
<b>Emergencia</b>	4	83.5	4	83.5	4	83.5	4	83.5
<b>Vegetativa</b>	53	809.9	53	809.9	57	893.4	57	893.4
<b>Floración</b>	12	153.6	12	153.6	69	1047.0	69	1047.0
<b>Formación de grano</b>	10	121.5	16	207.9	79	1168.5	85	1254.9
<b>Madurez fisiológica</b>	5	71.3	5	61.2	84	1239.8	90	1316.1
<b>Total del ciclo</b>	84		90					

El requerimiento térmico acumulado de la plantación a madurez fisiológica del cultivo fue similar entre las dos variedades, Dorada (1239.8 GDC °C) y Frondosa (1316.1 GDC °C) Díaz-Ortega *et al.* (2004), reportan para el amaranto 1629.0 GDC °C en los Valles Altos de México.

#### 4.3.4. Componentes del rendimiento del grano

La biomasa de grano, componente importante del rendimiento de amaranto, está determinada por la relación fuente-demanda. Los tejidos de la planta que son productores netos de carbono, generalmente tejidos verdes fotosintéticos que son exportadores netos de asimilados y consisten de órganos que crecen rápidamente (hojas). La potencia de demanda se refiere a la

habilidad de los órganos reproductivos para atraer o acumular compuestos de carbono. En una planta de amaranto, el órgano que demanda de mayor interés es el grano.

Al respecto, en México se han desarrollado variedades de alto rendimiento potencial caracterizadas por un mayor número de granos; sin embargo, presentan heterogeneidad en el llenado de los mismos, siendo inferiores las que no alcanzan a llenarse en madurez fisiológica, usualmente relacionada con periodos de déficit hídrico durante el periodo de formación de grano. El peso de la panoja (g); así como también el rendimiento de grano (g por planta y en t ha<sup>-1</sup>), eficiente uso de agua (kg mm<sup>-1</sup>), número de granos (g<sup>-1</sup>) e índice de cosecha (%), obtenidos y determinados al final del ciclo del amaranto en respuesta a las tres láminas de riego estudiadas, se concentran en el Cuadro 26.

**Cuadro 26.** Peso de panoja, grano, rendimiento de grano, eficiencia en uso de agua, número de granos (g<sup>-1</sup>) e índice de cosecha determinados al final del ciclo, como respuesta a las láminas de riego aplicadas.

<b>Lámina de irrigación</b>	<b>Peso de Panoja (PP)</b>	<b>Grano (G)</b>	<b>Rendimiento de grano (RG)</b>	<b>Eficiencia en uso de agua (EUA)</b>	<b>Número de granos (NG)</b>	<b>Índice de cosecha (IC)</b>
(ml planta <sup>-1</sup> )	(g planta <sup>-1</sup> )	(g.planta <sup>-1</sup> )	(t ha <sup>-1</sup> )	(kg mm <sup>-1</sup> )	(g <sup>-1</sup> )	(%)
150	26.0 <sup>b</sup>	8.11 <sup>b</sup>	2.03 <sup>b</sup>	9.74 <sup>b</sup>	1050.00 <sup>a</sup>	17.01 <sup>a</sup>
200	36.9 <sup>b</sup>	11.78 <sup>b</sup>	2.94 <sup>b</sup>	11.11 <sup>b</sup>	1058.33 <sup>a</sup>	16.07 <sup>a</sup>
250	64.1 <sup>a</sup>	20.55 <sup>a</sup>	5.14 <sup>a</sup>	15.87 <sup>a</sup>	1058.67 <sup>a</sup>	17.16 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

El rendimiento en grano, resultó muy superior significativamente con la lámina de riego de 250 ml con respecto a los tratamientos de 200 y 150 ml planta<sup>-1</sup>. Los rendimientos medios obtenidos en g por planta fueron de 20.55, 11.78 y 8.11; respectivamente. Mismos que representaron rendimientos en t ha<sup>-1</sup> de 5.14, 2.94 y 2.03, en los tratamientos de riego

mencionados anteriormente. La mayor producción de grano se asoció a la mayor cantidad de hojas y longitud de la panoja (Cuadro 21), a una mayor AF (Cuadro 24) y peso de la panoja (g planta<sup>-1</sup>) encontradas al aplicar 250 ml planta<sup>-1</sup> (Cuadro 26). Valores muy similares a los que reportan Olofintoye *et al.* (2015) en producción de grano de 5.68 t ha<sup>-1</sup> y un IC del 14.0%.

En referencia a la eficiencia en el uso del agua (EUA), al igual que para producción de materia fresca, la lámina de riego de 250 ml planta<sup>-1</sup>, reporta la mayor y significativa EUA en la producción de grano (15.87 kg mm<sup>-1</sup>), con respecto al obtenido con 200 y 150 ml planta<sup>-1</sup> (11.11 y 9.74 kg mm<sup>-1</sup>; respectivamente). No se mostraron diferencias significativas en las variables de número de granos y en índices de cosecha por efecto de láminas de riego (Cuadro 26).

En el Cuadro 27, se observa que con excepción de la variable número de granos (g<sup>-1</sup>), los componentes del rendimiento: peso de la panoja (g), rendimiento de grano (g planta<sup>-1</sup> y en t ha<sup>-1</sup>), el uso eficiente de agua (kg mm<sup>-1</sup>), e índice de cosecha (%), obtenidos y determinados al final del ciclo del amaranto en respuesta a las dos variedades Dorada y Frondosa, mostraron diferencias significativas estadísticamente. No obstante, la variable número de granos (1025.33 – 1086.00 granos g<sup>-1</sup>) son inferiores a los 1133.78 granos g<sup>-1</sup> reportados en raza Azteca (Díaz-Ortega, *et al.*, 2004); lo cual indica que los granos de Dorada (raza Mexicana) y Frondosa (raza Mercado) fueron de mayor tamaño respecto a la raza Azteca.



**Cuadro 27.** Peso de panoja, grano, rendimiento de grano, eficiencia en uso de agua, número de granos ( $g^{-1}$ ) e índice de cosecha determinados al final del ciclo, en las variedades estudiadas.

Variedad	Peso de Panoja (PP)	Grano (G)	Rendimiento de grano (RG)	Eficiencia en uso de agua (EUA)	Número de granos	Índice de cosecha (IC)
	(g planta <sup>-1</sup> )	(g planta <sup>-1</sup> )	(t ha <sup>-1</sup> )	(kg mm <sup>-1</sup> )	(g <sup>-1</sup> )	(%)
Dorada	35.82 <sup>b</sup>	12.08 <sup>b</sup>	3.02 <sup>b</sup>	9.32 <sup>b</sup>	1086.00 <sup>a</sup>	15.46 <sup>b</sup>
Froncosa	48.81 <sup>a</sup>	14.88 <sup>a</sup>	3.72 <sup>a</sup>	11.49 <sup>a</sup>	1025.33 <sup>a</sup>	18.03 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

En la variedad Froncosa se obtuvo el mayor rendimiento significativo en grano por planta (14.88), por consiguiente, un mayor rendimiento de grano en t ha<sup>-1</sup> (3.72) asociado al alto peso significativo de la panoja (48.81 g planta<sup>-1</sup>), asimismo una mejor producción de grano por mm<sup>-1</sup> de agua aplicada (EUA: 11.49) y un IC de 18.3 %. Los valores en la variedad Dorada en PP, G, RG, EUA e IC fueron: 35.82, 12.08, 3.02, 9.32 y 15.46; respectivamente. Baginsky *et al.* (2014) reportan que bajo las condiciones de riego *Amaranthus cruentus*, puede lograr rendimientos de 3.41 t ha<sup>-1</sup> con 166,000 plantas ha<sup>-1</sup>.

Por otra parte, los valores de IC obtenidos se encuentran por arriba de los reportado por Díaz-Ortega, *et al.* (2004) de 11.4 % con aplicación de 20 g de N m<sup>2</sup>. Pero dentro del rango de 10.5 a 22.5% indicado en especies domesticas de amaranto por Reinaudi *et al.* (2011). Además, investigaciones realizadas reportan que las variedades derivadas de *A. cruentus* generalmente presentan tendencia a generar follaje, mientras que las variedades de *A. hypochondriacus* concentran su producción hacia el grano (NAP, 1984; Becerra, 2000; Morales *et al.*, 2014). Lo anterior se ratifica en esta investigación bajo invernadero, dado que la variedad Froncosa (*A. hypochondriacus*) obtuvo el más alto valor significativo en IC (18.3%).

#### 4.3.5. Acumulación de Materia Seca (MS)

El Cuadro 28, describe la acumulación de materia seca en las diferentes estructuras de la planta de amaranto durante todo el ciclo del cultivo; raíz, tallo, hoja y panoja. Consistentemente la Materia Seca (MS) de todas las estructuras se incrementaron significativamente al aplicarse 250 ml planta<sup>-1</sup>.

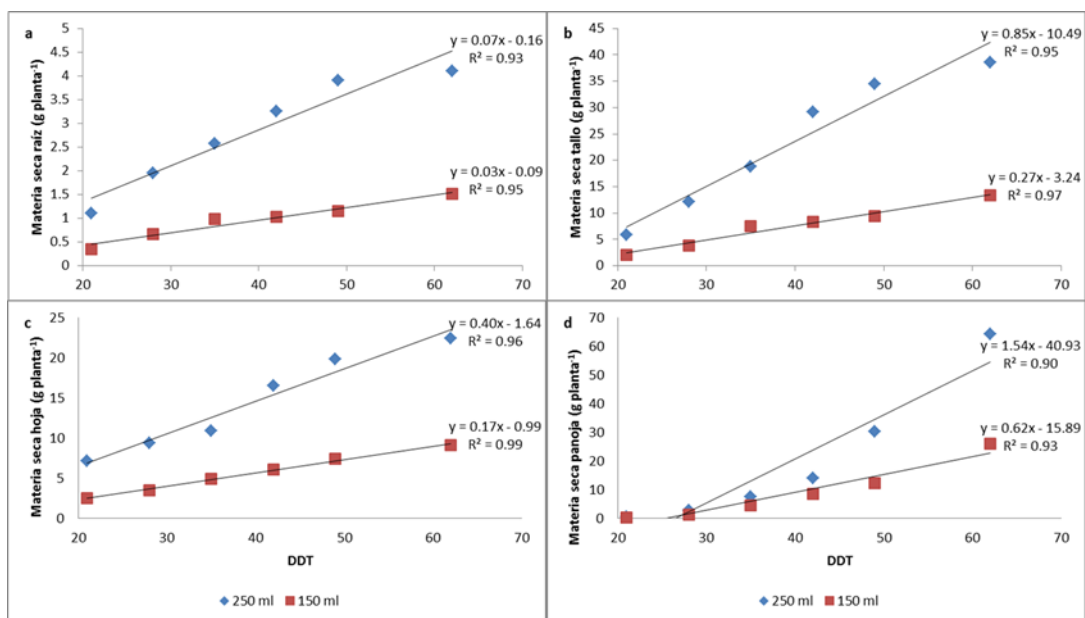
**Cuadro 28.** Producción de materia seca (MS) por planta (g): raíz, tallo, hoja y panoja en respuesta a las láminas de riego estudiadas.

Lámina de riego (ml planta <sup>-1</sup> )	DDT					
	21	28	35	42	49	62
	<b>Raíz</b>					
150	0.35 <sup>b</sup>	0.67 <sup>b</sup>	0.98 <sup>b</sup>	1.03 <sup>b</sup>	1.15 <sup>b</sup>	1.52 <sup>b</sup>
200	0.82 <sup>ab</sup>	1.18 <sup>ab</sup>	1.37 <sup>b</sup>	1.60 <sup>b</sup>	1.75 <sup>b</sup>	2.22 <sup>ab</sup>
250	1.11 <sup>a</sup>	1.96 <sup>a</sup>	2.57 <sup>a</sup>	3.26 <sup>a</sup>	3.91 <sup>a</sup>	4.10 <sup>a</sup>
	<b>Tallo</b>					
150	2.05 <sup>c</sup>	3.87 <sup>c</sup>	7.45 <sup>c</sup>	8.37 <sup>b</sup>	9.45 <sup>c</sup>	13.41 <sup>b</sup>
200	4.07 <sup>b</sup>	7.89 <sup>b</sup>	11.16 <sup>b</sup>	13.91 <sup>b</sup>	16.75 <sup>b</sup>	23.05 <sup>ab</sup>
250	5.83 <sup>a</sup>	12.16 <sup>a</sup>	18.85 <sup>a</sup>	29.12 <sup>a</sup>	34.40 <sup>a</sup>	38.57 <sup>a</sup>
	<b>Hoja</b>					
150	2.45 <sup>c</sup>	3.45 <sup>c</sup>	4.93 <sup>c</sup>	6.06 <sup>b</sup>	7.43 <sup>b</sup>	9.05 <sup>b</sup>
200	5.21 <sup>b</sup>	6.40 <sup>b</sup>	7.90 <sup>b</sup>	9.40 <sup>b</sup>	10.97 <sup>b</sup>	13.07 <sup>b</sup>
250	7.16 <sup>a</sup>	9.37 <sup>a</sup>	10.85 <sup>a</sup>	16.51 <sup>a</sup>	19.77 <sup>a</sup>	22.41 <sup>a</sup>
	<b>Panoja</b>					
150	0.20 <sup>b</sup>	1.23 <sup>b</sup>	4.36 <sup>b</sup>	8.58 <sup>b</sup>	12.21 <sup>c</sup>	26.01 <sup>b</sup>
200	0.32 <sup>ab</sup>	2.26 <sup>b</sup>	6.35 <sup>ab</sup>	12.60 <sup>a</sup>	19.80 <sup>b</sup>	36.85 <sup>b</sup>
250	0.48 <sup>a</sup>	2.85 <sup>a</sup>	7.51 <sup>a</sup>	13.98 <sup>a</sup>	30.22 <sup>a</sup>	64.10 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

Los valores obtenidos en este tratamiento oscilaron en raíz (de 1.1 a 4.10 g), tallo (5.83 a 38.57 g), hoja (7.16 a 22.41 g) y panoja (0.48 a 64.10 g), a los 21 y 62 DDT; respectivamente. Estos valores resultaron diferentes significativamente principalmente con aquellos determinados con la lámina de 150 ml planta<sup>-1</sup>, durante el mismo periodo: raíz (de 0.35 a 1.52 g), tallo (2.05 a

13.41 g), hoja (2.45 a 9.05 g) y panoja (0.20 a 26.01 g). Gráficamente se presenta en la Figura 14 el comportamiento de los dos tratamientos de irrigación (250 ml vs 150 ml) en comparación. Las ecuaciones de ajuste de las curvas variaron de  $R^2$  de 0.90 a 0.99.



**Figura 14.** Distribución de materia seca de las diferentes estructuras de la planta de amaranto: raíz (a), tallo (b), hoja (c) y panoja (d) en los tratamientos de irrigación de 250 y 150 ml por planta.

El Cuadro 29 concentra la producción de seca total (MST) por planta obtenida con los tratamientos de irrigación estudiados. Como esta variable resulta de la sumatoria de MS obtenida en cada estructura, la aplicación de 250 ml planta<sup>-1</sup> consecuentemente también obtuvo la mayor producción de MST, con respecto al tratamiento correspondiente a 150 ml planta<sup>-1</sup>. A la madures fisiológica (62 DDT) la producción de MST, en el tratamiento de 250 ml planta<sup>-1</sup>, se obtuvo 125.08 g planta<sup>-1</sup>. Altamente significativo con respecto al tratamiento 150 ml planta<sup>-1</sup> (48.47 g planta<sup>-1</sup>). Esto significa que la producción de materia seca es de 31.27 y 12.12 t ha<sup>-1</sup>;

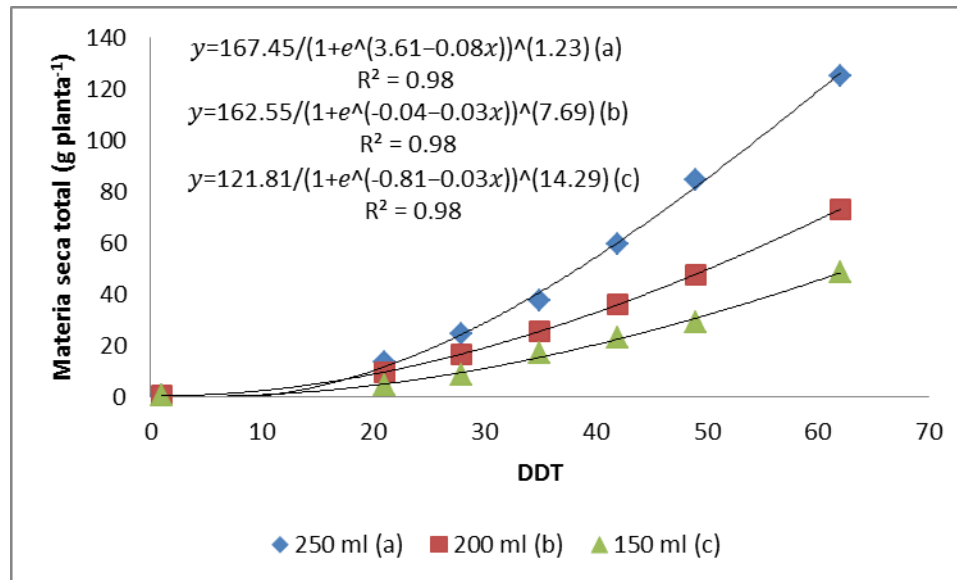
respectivamente. Olofintoye *et al.* (2015) reporta una producción de materia seca total de 35.54 t ha<sup>-1</sup>, en *Amaranthus cruentus*.

**Cuadro 29.** Producción de materia seca total (MST) por planta (g) durante todo el ciclo en respuesta a las láminas de riego estudiadas.

Lámina de riego (ml planta <sup>-1</sup> )	DDT					
	21	28	35	42	49	62
	g planta <sup>-1</sup>					
150	4.70 <sup>c</sup>	8.55 <sup>c</sup>	16.74 <sup>c</sup>	23.01 <sup>b</sup>	29.09 <sup>c</sup>	48.47 <sup>c</sup>
200	9.61 <sup>b</sup>	16.55 <sup>b</sup>	25.41 <sup>b</sup>	35.91 <sup>b</sup>	47.52 <sup>b</sup>	72.97 <sup>b</sup>
250	13.47 <sup>a</sup>	24.38 <sup>a</sup>	37.21 <sup>a</sup>	59.61 <sup>a</sup>	84.39 <sup>a</sup>	125.08 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

La Figura 14, muestra la acumulación de MST de los tratamientos de irrigación estudiados. La mayor tasa promedio de producción de MST se encontró con la aplicación de 250 ml planta<sup>-1</sup>. Esta ocurrió del inicio de formación de grano a la madurez fisiológica, en el periodo de 42 al 62 DDP (3.34 g planta día<sup>-1</sup>). Mientras que para el tratamiento de 150 ml planta<sup>-1</sup>, la mayor tasa la obtuvo durante llenado de grano y madurez fisiológica, que corresponde al periodo de los 49 al 62 DDT (1.49 g planta día<sup>-1</sup>).



**Figura 15.** Materia seca total (g planta<sup>-1</sup>) durante el ciclo de cultivo, en respuesta a las tres láminas de irrigación estudiadas.

El Cuadro 30 muestra la acumulación de MST del cultivo del amaranto; no hubo diferencias significativas entre las variedades Frondosa y Dorada estudiadas. Las dos variedades registraron un incremento lineal en producción de MST durante todo el ciclo de cultivo. La variedad Frondosa mostró ligeramente valores más altos en esta variable con respecto a Dorada.

**Cuadro 30.** Producción de materia seca total (MST) (g planta<sup>-1</sup>) durante todo el ciclo de las dos variedades estudiadas.

Cultivar	DDT						
	21	28	35	42	49	56*	62*
	g planta <sup>-1</sup>						
Dorada	7.33 <sup>b</sup>	15.28 <sup>a</sup>	24.33 <sup>a</sup>	39.25 <sup>a</sup>	52.52 <sup>a</sup>	78.58 <sup>a</sup>	---
Frondosa	11.18 <sup>a</sup>	17.77 <sup>a</sup>	28.55 <sup>a</sup>	39.77 <sup>a</sup>	54.81 <sup>a</sup>	---	85.54 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

\* Madurez fisiológica.

### 4.3.6. Indicadores Morfo-fisiológicos

#### 4.3.6.1. Efecto de lámina de riego

##### 4.3.6.1.1. Indicadores fisiológicos

##### 4.3.6.1.1.1. Tasa absoluta de crecimiento (TAC)

La tasa absoluta de crecimiento (TAC) no es constante en el tiempo, como consecuencia de la variación en la proporción de tejidos activos a lo largo del crecimiento. En esta investigación, la TAC se incrementó durante el ciclo de cultivo (Cuadro 31). Resultó más evidente en el tratamiento de irrigación de 250 ml planta<sup>-1</sup>, con respecto al de 150 ml planta<sup>-1</sup>. En el primer caso, inició con 1.67 g día planta<sup>-1</sup> (21-28 DDT) y finalizó con 4.34 g día planta<sup>-1</sup> en el periodo de los 49-62 DDT. Siendo superior estadísticamente con respecto al tratamiento 150 ml planta<sup>-1</sup> que inició con 0.59 y terminó con 2.37 g día planta<sup>-1</sup>; durante los mismos periodos señalados.

**Cuadro 31.** Valores de índices de crecimiento fisiológicos del amaranto: Tasa absoluta de crecimiento (TAC), Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN), en las tres láminas de irrigación.

Láminas de riego (ml planta <sup>-1</sup> )	DDT				
	21-28	28-35	35-42	42-49	49-62
	<b>Tasa absoluta de crecimiento</b>				
	<b>g día planta<sup>-1</sup></b>				
150	0.59 <sup>b</sup>	1.21 <sup>a</sup>	0.89 <sup>c</sup>	0.89 <sup>c</sup>	2.37 <sup>b</sup>
200	1.05 <sup>ab</sup>	1.27 <sup>a</sup>	1.53 <sup>b</sup>	1.68 <sup>b</sup>	2.54 <sup>b</sup>
250	1.67 <sup>a</sup>	1.92 <sup>a</sup>	3.29 <sup>a</sup>	3.63 <sup>a</sup>	4.34 <sup>a</sup>
	<b>Tasa de asimilación neta</b>				
	<b>mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup></b>				
150	0.48 <sup>a</sup>	0.62 <sup>a</sup>	0.21 <sup>b</sup>	0.25 <sup>a</sup>	0.76 <sup>a</sup>

200	0.66 <sup>a</sup>	0.47 <sup>ab</sup>	0.38 <sup>ab</sup>	0.29 <sup>a</sup>	0.52 <sup>b</sup>
250	0.68 <sup>a</sup>	0.45 <sup>b</sup>	0.51 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	0.47 <sup>b</sup>
	<b>Tasa relativa de crecimiento</b>				
	<b>g g<sup>-1</sup>día planta<sup>-1</sup></b>				
150	0.10 <sup>a</sup>	0.10 <sup>a</sup>	0.04 <sup>b</sup>	0.03 <sup>b</sup>	0.06 <sup>a</sup>
200	0.08 <sup>a</sup>	0.05 <sup>a</sup>	0.05 <sup>ab</sup>	0.04 <sup>ab</sup>	0.04 <sup>b</sup>
250	0.08 <sup>a</sup>	0.05 <sup>a</sup>	0.06 <sup>a</sup>	0.05 <sup>a</sup>	0.04 <sup>b</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

#### 4.3.6.1.1.2. Tasa de asimilación neta (TAN)

La tasa de asimilación neta (TAN) es una medida de la eficiencia del follaje, que es la principal fuente de fotoasimilados para la producción de materia seca. Este índice registra la velocidad de la fotosíntesis neta en un lapso de tiempo, y se debe conocer el cambio de los valores del área foliar y el peso seco de la planta, expresado en mg cm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Barrera *et al.*, 2010). Esta no es constante y decrece con la edad de la planta o población.

Con base en los resultados obtenidos (Cuadro 31), se observó que la TAN determinada en el tratamiento de irrigación de 250 ml por planta, en los primeros 28 DDT, fue de 0.68 mg cm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>. Con el tiempo disminuyó a 0.38 y 0.47 mg cm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup> en los intervalos de 42-49 y 49-62 DDT. La eficiencia de las plantas de amaranto como sistema asimilatorio durante todo el ciclo resultó superior con el tratamiento de 250 ml respecto a lo obtenido en el de 150 ml planta<sup>-1</sup> donde se estimaron valores de 0.50 y 0.46 mg cm<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>; respectivamente. Esto se asocia al mayor número de hojas, mayor área foliar y a una mayor producción de materia seca obtenida con el tratamiento de 250 ml planta<sup>-1</sup> durante este periodo de crecimiento, que correspondió prácticamente a la etapa vegetativa donde además se acumuló los más altos GDC °C. Este comportamiento se explica por la alta actividad asimilatoria de hojas jóvenes debido a la demanda de fotosintatos por los tejidos en crecimiento y baja actividad respiratoria de las

diferentes partes de la planta. La disminución de la TAN con la edad de las plantas ha sido explicada parte porque la proporción del tejido respiratorio es mayor al tejido fotosintético y porque disminuye la capacidad fotosintética por unidad de área relacionada con la longevidad foliar (Díaz-Ortega, 1994). Según Barraza *et al.* (2004), los mayores valores de TAN indican mayor ganancia de materia seca por unidad de tejido asimilatorio y por unidad de tiempo, lo cual indica una mayor eficiencia fotosintética promedio.

#### **4.3.6.1.1.3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)**

Bajo condiciones favorables para el crecimiento, la ventaja de una alta tasa de desarrollo foliar es un aumento del área fotosintética y por lo tanto una mayor tasa de crecimiento. En estas condiciones una mayor distribución de biomasa a hojas es adecuada en términos de crecimiento, pero asociada a una mayor pérdida de agua (Poorter, 1989).

Al igual que la TAN, la TRC fue superior estadísticamente en el tratamiento de irrigación de 250 vs 150 ml planta<sup>-1</sup>, durante el mismo periodo de evaluación (Cuadro 31). La TRC con 250 ml planta<sup>-1</sup> obtuvo valores de 0.06 y 0.05 g g día planta<sup>-1</sup>, mientras que el de 150 ml planta<sup>-1</sup> sus valores fueron de 0.04 y 0.03 g g día planta<sup>-1</sup> a los 42 y 49 DDT; respectivamente. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas.

La tendencia a disminuir la TRC se atribuye al incremento en la producción de tejidos estructurales no fotosintéticos conforme la planta madura (Teasdale y Abdul-Baki, 1997).

#### **4.3.6.1.2. Indicadores morfológicos**

##### **4.3.6.1.2.1. Razón de Área Foliar (RAF)**



La razón de área foliar (RAF), es uno de los principales parámetros morfológicos, utilizado para evaluar la relación entre el área foliar (sistema asimilatorio) y el peso seco total de la planta. De acuerdo con el Cuadro 32, el máximo valor medio ( $162.7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ), que correspondió al tratamiento de irrigación de  $150 \text{ ml planta}^{-1}$ , se presentó al inicio del desarrollo de la planta (21-28 DDT), luego tendió a decrecer en forma paulatina hasta el final del ciclo ( $84.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Por el contrario, el tratamiento de irrigación de  $250 \text{ ml planta}^{-1}$ , la RAF de los 21-28 DDT alcanzó un valor medio de  $128.8 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$  y disminuyó al final del ciclo a  $87.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ , siendo éste al inicio significativamente menor con respecto al primer tratamiento de irrigación, aunque al final no hubo diferencia estadística.

**Cuadro 32.** Valores de índices morfológicos del amaranto: Razón de área foliar (RAF), Razón de peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago en las tres láminas de irrigación.

Láminas de riego ( $\text{ml planta}^{-1}$ )	DDT					
	21-28	28-35	35-42	42-49	49-62	
	<b>Razón de área foliar</b>					
	<b><math>\text{cm}^2 \text{ g planta}^{-1}</math></b>					
150	162.67 <sup>a</sup>	163.14 <sup>a</sup>	131.69 <sup>a</sup>	119.72 <sup>a</sup>	84.05 <sup>a</sup>	
200	125.70 <sup>b</sup>	143.06 <sup>b</sup>	129.95 <sup>a</sup>	118.66 <sup>a</sup>	88.98 <sup>a</sup>	
250	128.88 <sup>b</sup>	143.92 <sup>b</sup>	133.24 <sup>a</sup>	128.38 <sup>a</sup>	87.03 <sup>a</sup>	
	<b>DDT</b>					
	21	28	35	42	49	62
	<b>Razón de peso foliar</b>					
	<b><math>\text{g g planta}^{-1}</math></b>					
150	0.50 <sup>a</sup>	0.38 <sup>a</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.25 <sup>a</sup>	0.24 <sup>a</sup>	0.18 <sup>a</sup>
200	0.50 <sup>a</sup>	0.36 <sup>a</sup>	0.29 <sup>a</sup>	0.24 <sup>a</sup>	0.22 <sup>b</sup>	0.18 <sup>a</sup>
250	0.49 <sup>a</sup>	0.35 <sup>a</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.22 <sup>b</sup>	0.17 <sup>a</sup>
	<b>Raíz-vástago</b>					
150	0.074 <sup>a</sup>	0.081 <sup>a</sup>	0.058 <sup>a</sup>	0.045 <sup>a</sup>	0.039 <sup>a</sup>	0.032 <sup>a</sup>
200	0.082 <sup>a</sup>	0.074 <sup>a</sup>	0.055 <sup>a</sup>	0.044 <sup>a</sup>	0.036 <sup>a</sup>	0.031 <sup>a</sup>
250	0.082 <sup>a</sup>	0.078 <sup>a</sup>	0.069 <sup>a</sup>	0.055 <sup>a</sup>	0.046 <sup>a</sup>	0.032 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

Los altos valores observados al inicio del ciclo, se pueden asociar con una estrategia de sobrevivencia de las plantas, para captar y procesar mejor la energía solar, lo cual es necesario para establecerse rápidamente, después del trasplante. La tendencia decreciente de la RAF se puede explicar, considerando el incremento en biomasa de la planta durante el ciclo de crecimiento, el cual proviene principalmente del incremento en peso de órganos como es la panoja.

La dinámica de la RAF en los tratamientos de lámina de riego coincide con lo observado en otros cultivos, donde la mayor RAF se aprecia en la etapa vegetativa, lo cual ocurre debido a que los fotoasimilados están involucrados en la producción de área foliar, y que progresivamente con el transcurso del tiempo, bajas cantidades de fotoasimilados son involucradas en la producción de esta área foliar (Morales, 1999).

#### ***4.3.6.1.2.2. Razón del peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago***

La razón del peso foliar (RPF) es un índice de la cantidad del follaje de la planta expresada con respecto a su peso total en  $\text{g g planta}^{-1}$ . No se manifestaron diferencias significativas entre los tratamientos de irrigación estudiados. Un valor medio de esta variable de los 21 hasta los 62 DDT fue de 0.495 a 0.175  $\text{g g planta}^{-1}$ ; respectivamente. De igual manera la variable relación Raíz/Vástago, que puede considerarse como el índice más simple de distribución de biomasa en el sistema radical, no resultó diferente estadísticamente durante todo el ciclo del cultivo de amaranto. Sus valores medios oscilaron entre 0.078 y 0.031, de los 21 a los 62 DDT; respectivamente. Siendo un 243.6% y 270.0% menores a los que reporta Mapes *et al.*,

(1995) al inicio y final del cultivo de amaranto desarrollado bajo condiciones restrictivas de agua, de 0.19 y 0.085. Esto se explica a que la irrigación se realizó de manera localizada (a nivel raíz) y de alta frecuencia (diariamente), que aseguró un buen abastecimiento hídrico durante el ciclo de crecimiento del cultivo de amaranto.

Con base en la información obtenida, el análisis de la TRC y sus componentes: TAN, RAF y la RPF, pueden ayudar a comprender la variación en el crecimiento y desarrollo de la planta de amaranto bajo las condiciones de riego en que fue llevado a cabo el experimento (Lambers *et al.*, 1998). Las tasas de crecimiento y la eficiencia en el uso del agua pueden ser influenciados por la distribución de asimilados a los diferentes órganos y las propiedades morfológicas y fisiológicas de estos órganos. La influencia de caracteres fisiológicos sobre la eficiencia en el uso del agua depende del balance entre los efectos sobre el crecimiento y sobre el uso del agua. Los caracteres de la planta que aumenta la EUA pueden interactuar con aquellos que promueven la tasa de crecimiento. El modelo de distribución de asimilados que favorece el crecimiento o la eficiencia en el uso del agua depende de la disponibilidad de agua.

#### **4.3.6.2. Respuesta de variedades de amaranto**

##### **4.3.6.2.1. Indicadores fisiológicos**

###### **4.3.6.2.1.1. Tasa absoluta de crecimiento (TAC)**

Generalmente, el crecimiento de una planta se determina mediante medidas directas (altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, área foliar, masa seca) e indirectas como la TAN, TAC y TRC entre otras (Barraza *et al.*, 2004). A partir de esta información se elaboran curvas de crecimiento del cultivo de interés las cuales son un reflejo del comportamiento de una

planta en un ambiente en particular con respecto al tiempo. El propósito es la aplicación racional de las prácticas de manejo agronómico en el momento adecuado, para garantizar una respuesta óptima del cultivo de acuerdo a ciertas necesidades y exigencias (Casierra-Posada *et al.*, 2004).

En esta investigación, la TAC se incrementó durante el ciclo de cultivo de amaranto en las dos variedades estudiadas (Cuadro 33). Resultó más evidente en la variedad Dorada en la etapa de floración de los 35-42 DDT (2.16 g día planta<sup>-1</sup>) y en la madurez fisiológica, de los 49-56 DDT (3.79 g día planta<sup>-1</sup>). Significativamente diferente a los obtenidos en la variedad Frondosa en la misma etapa de floración y a la madurez fisiológica (1.65 y 2.38 g día planta<sup>-1</sup>); respectivamente.

**Cuadro 33.** Valores de índices de crecimiento fisiológicos del amaranto: Tasa absoluta de crecimiento (TAC), Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de asimilación neta (TAN) a diferentes días después del trasplante (DDT) en dos variedades de amaranto.

Variedad	DDT					
	21-28	28-35	35-42	42-49	49-56*	49-62*
<b>Tasa absoluta de crecimiento</b>						
<b>g día planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	1.21 <sup>a</sup>	1.35 <sup>a</sup>	2.16 <sup>a</sup>	1.97 <sup>a</sup>	3.79 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	1.01 <sup>a</sup>	1.59 <sup>a</sup>	1.65 <sup>b</sup>	2.16 <sup>a</sup>	---	2.38 <sup>b</sup>
<b>Tasa de asimilación neta</b>						
<b>mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	0.67 <sup>a</sup>	0.44 <sup>b</sup>	0.46 <sup>a</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.71 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	0.55 <sup>a</sup>	0.59 <sup>a</sup>	0.27 <sup>b</sup>	0.34 <sup>a</sup>	---	0.45 <sup>b</sup>
<b>Tasa relativa de crecimiento</b>						
<b>g g día planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	0.11 <sup>a</sup>	0.07 <sup>a</sup>	0.06 <sup>a</sup>	0.03 <sup>a</sup>	0.06 <sup>a</sup>	---
<b>Frondosa</b>	0.06 <sup>b</sup>	0.07 <sup>a</sup>	0.04 <sup>a</sup>	0.04 <sup>a</sup>	---	0.03 <sup>b</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

\* Madurez fisiológica.

#### 4.3.6.2.1.2. Tasa de asimilación neta (TAN)

En el Cuadro 33 se presentan los valores de la tasa de asimilación neta (TAN). Los resultados obtenidos muestran que la TAN determinada en la variedad Dorada en la etapa de 35-42 DDT que corresponde a floración (0.46 mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup>) y 49-56 DDT que corresponde a madurez fisiológica (0.71 mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup>) resultó diferente significativamente con respecto a la variedad Frondosa (0.27 mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup> y 0.45 mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup>), en las dos etapas fenológicas anteriormente señaladas. Las diferencias encontradas a la madurez fisiológica, se pueden relacionar con los valores más altos obtenidos en AF y en producción de biomasa fresca, al final del ciclo. Es conveniente señalar que la variedad Frondosa, en la etapa vegetativa, mostró un valor superior estadísticamente con respecto a la variedad Dorada (0.59 y 0.44 mg cm<sup>2</sup> día planta<sup>-1</sup>), que precisamente coincide donde el amaranto acumuló los más altos GDC °C durante el ciclo.

#### **4.3.6.2.1.3. Tasa relativa de crecimiento (TRC)**

Al igual que la TAN, la TRC de la variedad Dorada mostró resultados diferentes significativamente a la madurez fisiológica (0.06 g g día planta<sup>-1</sup>) que la variedad Frondosa (0.03 g g día planta<sup>-1</sup>) Cuadro 33.

#### **4.3.6.2.2. Indicadores morfológicos**

##### **4.3.6.2.2.1. Razón de área foliar (RAF)**

En el Cuadro 34 se presentan los valores de Índices Morfológicos del amaranto, Razón de área foliar, Razón de peso foliar y Relación Raíz/Vástago del amaranto en las variedades Dorada y Frondosa estudiadas.

**Cuadro 34.** Valores de índices morfológicos del amaranto: Razón de área foliar (RAF), Razón de peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago a distintos días después del trasplante (DDT) en dos variedades de amaranto.

Variedades	DDT						
	21-28	28-35	35-42	42-49	49-56*	49-62*	
	<b>Razón de área foliar</b>						
	<b>cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	161.56 <sup>a</sup>	165.24 <sup>a</sup>	140.16 <sup>a</sup>	131.80 <sup>a</sup>	98.22 <sup>a</sup>	---	
<b>Froncosa</b>	116.61 <sup>b</sup>	134.83 <sup>b</sup>	123.09 <sup>b</sup>	114.28 <sup>b</sup>	---	75.16 <sup>b</sup>	
	<b>DDT</b>						
	21	28	35	42	49	56*	62*
	<b>Razón de peso foliar</b>						
	<b>g g planta<sup>-1</sup></b>						
<b>Dorada</b>	0.51 <sup>a</sup>	0.40 <sup>a</sup>	0.30 <sup>a</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.24 <sup>a</sup>	0.20 <sup>a</sup>	---
<b>Froncosa</b>	0.48 <sup>a</sup>	0.33 <sup>b</sup>	0.26 <sup>b</sup>	0.24 <sup>b</sup>	0.21 <sup>b</sup>	---	0.14 <sup>b</sup>
	<b>Raíz-vástago</b>						
<b>Dorada</b>	0.082 <sup>a</sup>	0.075 <sup>a</sup>	0.062 <sup>a</sup>	0.045 <sup>a</sup>	0.043 <sup>a</sup>	0.035 <sup>a</sup>	---
<b>Froncosa</b>	0.077 <sup>a</sup>	0.081 <sup>a</sup>	0.059 <sup>a</sup>	0.051 <sup>a</sup>	0.038 <sup>a</sup>	---	0.028 <sup>a</sup>

Medias con la misma letra en cada columna y variable son iguales estadísticamente (P<0.05).

\* Madurez fisiológica.

De acuerdo con el Cuadro 34, la variedad Dorada mostró diferencias significativas en los valores de RAF. Al inicio del crecimiento en la etapa vegetativa (21-35 DDT) reportó los valores más altos, 161.56 y 165.24 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup> para enseguida descender a un valor de 98.22 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup>, en la etapa de madurez fisiológica. La variedad Froncosa, los valores de RAF fueron menores: de 116.61 y 134.83 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup> en la etapa vegetativa. Mientras que al final, en la etapa de madurez fisiológica disminuyó hasta un valor de 75.16 cm<sup>2</sup> g planta<sup>-1</sup>.

#### **4.3.6.2.2.2. Razón del peso foliar (RPF) y Relación Raíz/Vástago**

La proporción de la planta que correspondió a hojas, a través del tiempo para las dos variedades se presenta en el Cuadro 34. Con excepción del periodo de 21-28 DDT, el análisis de varianza reportó diferencias significativas entre las dos variedades de amaranto Dorada y Frondosa estudiadas, en la variable RPF, durante todo el ciclo. La Variedad Dorada inició con un valor de  $0.51 \text{ g g planta}^{-1}$  y terminó con un valor de  $0.20 \text{ g g planta}^{-1}$ . Mientras que la variedad Frondosa tuvo un valor de RPF de  $0.48 \text{ g g planta}^{-1}$  y al final del ciclo reportó solo  $0.14 \text{ g g planta}^{-1}$ . Asimismo, la variable Relación Raíz/Vástago, no resultó diferente estadísticamente durante todo el ciclo del cultivo de amaranto en las dos variedades Dorada y Frondosa. Sus valores medios oscilaron entre 0.082 y 0.035 para Dorada y 0.077 y 0.028 para Frondosa, de los 21 a los 62 DDT; respectivamente. Mapes *et al.*, (1995) reporta valores más altos al inicio y final del cultivo en la raza Mexicana (0.18 y 0.09, respectivamente) de la cual deriva Dorada, y en la raza Mercado (0.20 y 0.08, respectivamente) de la que resulta Frondosa. Fitter y Hay (1987), señalan que la relación Raíz/Vástago se incrementa con la disminución del suministro de agua debido a que generalmente las plantas tienden a incorporar mayor cantidad de recursos en la producción de raíces en aquellos ambientes en los que el crecimiento está limitado por factores del suelo. En esta investigación, los valores bajos del cociente, se explican tanto por el uso de un sustrato inerte (fibra de coco) como a la frecuencia de irrigación diaria y localizada, desde el trasplante hasta la cosecha del experimento del cultivo de amaranto.



#### 4.4 Conclusiones

1. Las variables de altura final y diámetro de tallo de la planta, así como el número de hojas, longitud de la panoja en el periodo de floración a madurez fisiológica del amaranto, resultaron significativamente afectadas por el tratamiento de 250 ml planta<sup>-1</sup> con respecto al de 150 ml planta<sup>-1</sup>.
2. La variedad Frondosa reportó, del periodo de 21 hasta 42 DDT, significativamente el mayor número de hojas por planta, con respecto a la variedad Dorada. En ambas variedades, el mayor número de hojas coincidió, durante la formación de grano. No obstante, final del ciclo no mostraron diferencias significativas en las variables: altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud de la panoja.
3. Consistentemente los rendimientos de biomas fresca (g planta<sup>-1</sup>) fueron superiores cuando la lámina de irrigación correspondió a la aplicación de 250 ml planta<sup>-1</sup>. Asimismo, la variedad Dorada superó significativamente en esta misma variable a la variedad Frondosa.
4. El AF de la planta de amaranto se afectó por la lámina de irrigación (250 ml planta<sup>-1</sup>) durante todo el ciclo del cultivo: Mientras que en ésta variable, la variedad Dorada fue superior estadísticamente a la variedad Frondosa, solo al final del ciclo.
5. El requerimiento térmico acumulado de la plantación a madurez fisiológica resultaron similares para las dos variedades: Frondosa (1316.0 GDC °C) y Dorada (1239.8 GDC °C). El 72.06 % y el 67.9% % de unidades calor del total para el *A. hypochondriacus* variedad Frondosa y *A. cruentus* variedad Dorada se determinaron a los 53 DDS (etapa vegetativa). Estos resultados constituyen la primera referencia con relación a GDC para amaranto bajo condiciones de invernadero.

6. El tratamiento correspondiente a la lámina de riego de 250 ml planta<sup>-1</sup> reportó significativamente mayor rendimiento de grano planta<sup>-1</sup> (5.14 t ha<sup>-1</sup>), en peso de panoja y EUA. En la variedad Frondosa se obtuvo el mayor rendimiento significativo en grano por planta (14.88 g), por consiguiente un mayor rendimiento de grano en t ha<sup>-1</sup> (3.72) asociado al alto peso significativo de la panoja (48.81 g planta<sup>-1</sup>), asimismo una mayor EUA e índice de cosecha.
7. Consistentemente la MS de todas las estructuras de la planta (raíz, tallo, hoja y panoja) se incrementaron significativamente al aplicarse 250 ml por planta. Consecuentemente también obtuvo la mayor producción de MST.
8. La acumulación de MST del cultivo del amaranto; no resultó diferente significativamente entre ambas variedades. Sólo en panoja a la madurez fisiológica, la producción de materia seca resultó diferente entre la variedad Frondosa y Dorada, (48.81 vs 35.82 g); respectivamente.
9. La TCA, TAN y la TCR se afectaron significativamente por el tratamiento de irrigación de 250 ml planta<sup>-1</sup>. De igual manera, la variedad Dorada, resultó afectada en las mismas variables, con respecto a la variedad Frondosa.
10. Los Indicadores morfológicos mostraron que solo la razón de área foliar (RAF), fue afectada significativamente por la lámina de riego de 150 ml planta<sup>-1</sup> al inicio del desarrollo de la planta (28 DDT). La variedad Dorada presentó significativamente mayor RAF y RPF respecto a Frondosa.
11. Con base en los resultados obtenidos en IC en este estudio, indican que la *A. hypochondriacus* variedad Frondosa sobresalió para la producción de grano mientras que

*A. cruentus* variedad Dorada, para forraje. Mientras que con 250 ml planta<sup>-1</sup> se obtiene de forma más eficiente mayor producción de forraje fresco y grano.

## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN GENERAL

Actualmente, el cambio climático es uno de los problemas ambientales más serios que enfrenta el hombre debido a que puede afectar negativamente la productividad de la agricultura, a causa de la variabilidad de las lluvias, de la temperatura y de otros factores climáticos que afectan la producción agrícola (FAO, 1997). Se estima que para 2050, los rendimientos de los cultivos pueden ser disminuidos desde un 10 hasta un 50 % debido al cambio climático, al alterar la disponibilidad del agua, la estación de crecimiento, las fechas de siembra y la programación de las cosechas (Rosegrant *et al.* 2008).

Lo anterior resulta relevante para los países en desarrollo, como México, donde la mayoría de los productores practican una agricultura de temporal, de baja productividad y en consecuencia en bajos ingresos. En nuestro país, por ejemplo, la superficie cultivada de amaranto fue de 4,546 ha, mayoritariamente en temporal (97.2 %), con solo el 2.8 % restante con riego (127 ha); el rendimiento promedio nacional para temporal en el ciclo primavera-verano, fue 1.316 t ha<sup>-1</sup> y en riego de 2.12 (SIAP, 2016). En 2015, durante el periodo Otoño-Invierno la superficie de amaranto cultivada fue de 22 ha, con un rendimiento de grano de 0.90 t ha<sup>-1</sup>. Esto podría ser debido a los cambios edáficos y ambientales que han ocurrido en las zonas de México donde se cultiva el amaranto.

La disponibilidad irregular de agua es un problema mundial, aún en zonas de alta precipitación (Wanjura y Upchurch, 2000). En el caso de las zonas áridas y semiáridas las sequías recurrentes y la competencia por el agua son las principales amenazas al desarrollo en estas regiones; por tanto, la agricultura de riego debe disminuir los volúmenes aplicados sin una merma significativa en los rendimientos de un cultivo en cantidad y calidad (Sadiku y Sadiku, 2012). En condiciones de baja disponibilidad y alta competencia por agua, se requiere una

estrategia integral de manejo para mejorar la productividad del cultivo de amaranto. Hoy en día, algunos productores están incrementando el uso del manejo de la irrigación según la etapa de crecimiento, denominado déficit de riego regulado, donde el cultivo es intencionalmente estresado en etapas estratégicas de su crecimiento con el propósito de reducir el riego y/o disminuir la evapotranspiración, reduciendo al mínimo las pérdidas de rendimiento (Bausch *et al.*, 2010).

El amaranto es aprovechado en varias formas: grano, vegetal y forraje. Es también un cultivo altamente eficiente, que prospera bajo condiciones adversas como la sequía, altas temperaturas y en suelos salinos (Li *et al.*, 2010). En México, una parte importante del estado de San Luís Potosí es considerada como árida (Relación de precipitación/evaporación:0.00-0.20), según la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA). Por lo tanto, el cultivo de amaranto representa una fuente potencial de alimento (Barba de la Rosa *et al.*, 2009). Sin embargo, el bajo rendimiento en grano del amaranto, en comparación con otros cereales tradicionales (maíz, trigo, arroz), parece limitar a futuro las oportunidades comerciales del cultivo. Generalmente, el bajo potencial de rendimiento del grano de amaranto se atribuye a que los estudios de mejoramiento, manejo y sobre parámetros de crecimiento han sido marginados comparativamente con respecto a otros cultivos; además de que las propiedades fisiológicas de la planta restringen el nivel de rendimiento, entre otros factores. Asegurar una humedad adecuada en la zona de raíces durante las etapas críticas es esencial para obtener rendimientos óptimos.

Las etapas críticas del amaranto, desde el punto de vista hídrico, varían según la especie. En *A. hypochondriacus* ocurre en etapa vegetativa, mientras que para *A. cruentus* se da en floración; en ambas especies, la deficiencia de agua durante el llenado del grano tiene menor efecto sobre la producción (Ayodele, 2000). Así mismo, el análisis de crecimiento de las plantas

se ha desarrollado durante las últimas décadas como una disciplina relacionada con la ecofisiología y la agronomía, con sus propios conceptos, términos y herramientas de cálculo (Valladares y Sánchez-Gómez, 2006).

Hasta ahora, poco es conocido cuantitativamente acerca de los procesos que limitan la formación y el rendimiento de grano del amaranto. Por lo tanto, el análisis detallado de los parámetros de crecimiento del cultivo, el análisis del crecimiento de la planta y el desarrollo con el tiempo en dependencia de las condiciones climáticas ayudan a entender mejor la formación del rendimiento y revelan las limitaciones fisiológicas de crecimiento y la producción de grano. Existen pocos estudios sobre el amaranto bajo condiciones de invernadero (Chávez-Servin *et al.*, 2017), así como de su cultivo a cielo abierto en el ciclo otoño invierno (García-Pereyra *et al.*, 2009); razón que, aunado a las condiciones ambientales cambiantes y a la escasez de agua, ha conducido a la necesidad de un sistema alternativo que maneje eficientemente el agua de irrigación en el campo (Suresh *et al.*, 2014), como el riego por goteo, que consiste en aplicar un bajo volumen de agua, de manera más frecuente que en los sistemas tradicionales, para mantener un rango de humedad en la zona radical que resulte óptimo para el crecimiento de la planta. Por lo que la presente investigación adquiere gran relevancia al evaluar el comportamiento de dos genotipos de amaranto bajo condiciones controladas y en campo durante el ciclo otoño–invierno 2015, mediante la técnica de fertigación, utilizando el riego localizado.

En esta investigación se observó que bajo invernadero los dos genotipos evaluados (*A. cruentus*, variedad Dorada y *A. hypochondriacus*, variedad Frondosa) redujeron su ciclo total de crecimiento en alrededor de 20 días, con respecto a campo. Bajo esta última condición, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre 2015, se registraron temperaturas mínimas por debajo de los 8 °C, considerada para el crecimiento del cultivo del amaranto como no adecuadas

(Cristaudo *et al.*, 2007); se registraron valores de 6.5, 4.5 y 0.1°C, respectivamente; sin embargo, estas temperaturas no afectaron irreversiblemente al cultivo, lo que se atribuye al suministro adecuado de nutrientes y buen manejo de la irrigación. Así mismo, se cuantificó un mayor requerimiento térmico del cultivo bajo ambiente protegido (del 36%) de los grados días de crecimiento (GDC) acumulados en las dos variedades con respecto a cielo abierto. Los GDC estimados en el experimento de campo coinciden con los que reportan García-Pereyra *et al.* (2016), quienes encontraron a la madurez del amaranto una acumulación de GDC entre 959 a 977 °C, durante el mismo periodo de crecimiento (agosto-diciembre).

Al respecto, se determinó un incremento del número de hojas planta<sup>-1</sup> en un 570 y 590 % (*A. hypochondriacus* variedad Frondosa y *A. cruentus* variedad Dorada, respectivamente) al comparar el cultivo de amaranto utilizando como sustrato fibra de coco en invernadero con respecto al sistema de cultivo en suelo y campo. Lo cual explica la mayor área foliar (Rodríguez, 2000) que se encontró bajo condiciones de invernadero con respecto a campo, registrando incrementos del 1166.6 y 1250 %, en los genotipos *A. hypochondriacus* variedad Frondosa y *A. cruentus*, variedad Dorada; respectivamente. El menor número de hojas y área foliar en condiciones de campo se atribuye al diseño de plantación y a un efecto de densidad de población (Igbokwe y Hollins, 2000; Moshaver *et al.*, 2016), así como a la menor frecuencia de irrigación.

Los más altos rendimientos en biomasa fresca fue obtenida con *A. cruentus* variedad Dorada en ambos sistemas de producción (62.6 y 103.5 t ha<sup>-1</sup> campo e invernadero, respectivamente). El rendimiento de forraje verde para *A. hypochondriacus* variedad Frondosa se incrementó en un 97.8 % al establecerse este cultivo bajo ambiente protegido (además, se redujo la fecha de corte 10 días), así como también la producción de materia seca total y por consecuencia el rendimiento en grano por planta como respuesta a una buena nutrición e

irrigación (Croft *et al.*, 2017), y a un mejor control de la temperatura (Cristaudo *et al.*, 2007). Con respecto a la producción de materia seca total (MST), esta se incrementó en un 83.6 % en ambas variedades bajo agricultura protegida con respecto a campo.

Los índices fisiológicos Tasa de asimilación neta (TAN) y Tasa de crecimiento relativo (TCR) explican el comportamiento de las dos variedades de amaranto estudiadas en condiciones de invernadero con respecto a campo. La TAN, resultó mayor en condiciones protegidas que a cielo abierto; esto fue más marcado en *A. cruentus* variedad Dorada, ya que mejoró su eficiencia fotosintética en un 16%, lo que explica el incremento de un 278.5% de la TRC en esta variedad, muy superior al incremento de 8.5% encontrado en *A. hypochondriacus* variedad Frondosa. Un valor más alto de la TAN significa mayor eficiencia fotosintética, lo que resulta en un incremento de la producción de materia seca (Barraza *et al.*, 2004).

El área foliar específica (AFE), como un indicador morfológico (IM) que es afectado por condiciones ambientales como intensidad de la luz y época del año (Lee y Heuvelink, 2003), indica que bajo condiciones de invernadero las dos variedades de planta tienen una mayor densidad de las hojas (AFE). Su valor de AFE ( $510.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) superó al encontrado en plantas desarrolladas en campo: *A. cruentus*, variedad Dorada ( $216.2 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ) y *A. hypochondriacus* variedad Frondosa ( $266.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ ). Para la razón de área foliar (RAF), otro de los IM determinados que indica la relación entre el área foliar y el peso seco total de la planta (Gardner *et al.*, 1985), al igual que el AFE, las plantas de amaranto desarrolladas en invernadero, con respecto a campo, incrementaron en un 294.4 y 141.8 % en *A. cruentus*, variedad Dorada y *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, respectivamente, lo cual es atribuido al mayor número de hojas y área foliar por planta.



En relación a los componentes del rendimiento del grano, el peso seco de la panoja (g) bajo condiciones de invernadero con respecto a campo, se incrementó 181.8 y 120.8 % en *A. cruentus*, variedad Dorada y *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, respectivamente. Mientras que para rendimiento en grano  $\text{ha}^{-1}$  (en plantas de invernadero) superó en un 116.1 y 61.9 % a aquellas desarrolladas en campo, en donde se obtuvieron 1.4 y 2.3  $\text{t ha}^{-1}$  de grano en *A. cruentus*, variedad Dorada y *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, respectivamente. El número de granos  $\text{g}^{-1}$  en ambos genotipos disminuyó en un 10.7 % cuando el cultivo de amaranto se desarrolló en invernadero, lo cual indica que los granos fueron más grandes en éste sistema de producción. *A. hypochondriacus* variedad Frondosa, tanto en invernadero y en condiciones de campo, se caracterizó por una mayor producción de grano, Mientras que *A. cruentus* variedad Dorada en producción de biomasa fresca.

Así mismo, al evaluarse la eficiencia del uso de agua (EUA) en la producción de forraje verde y grano, los dos genotipos de amaranto produjeron mayor cantidad de forraje y grano  $\text{mm}^{-1}$  de agua utilizada en condiciones de invernadero. *A. cruentus* variedad Dorada, para producir 9.32 kg de grano requirió de 1  $\text{m}^3$  de agua bajo condiciones de invernadero, mientras que para producir esta misma cantidad de grano en campo se requirieron 2.14  $\text{m}^3$  de agua. Por su parte, *A. hypochondriacus* variedad Frondosa produjo 11.5 kg de grano con un  $\text{m}^3$  de agua, por lo tanto se necesitaron 1.60  $\text{m}^3$  de agua para obtener la misma producción en campo.

Por otra parte, el nutrimento nitrógeno es de los factores primarios que limitan la producción del cultivo de amaranto (Van Heemst, 1988). Esto va aunado a que en México el amaranto se cultiva frecuentemente sin riego, en suelos con bajos contenidos de materia orgánica y de nitrógeno (Hernández *et al.*, 2014; SIAP, 2016). En el corto y mediano plazo, un reto importante que persiste tanto en la agricultura mundial como nacional es lograr mayores avances

en el uso eficiente de los fertilizantes en combinación con mejores prácticas agrícolas, a fin de incrementar la productividad y rentabilidad de los cultivos y en específico del amaranto. Así, su uso en la forma, cantidad y tiempo adecuados incrementará su eficiencia agronómica y económica.

En este contexto, una alternativa con amplio potencial es el uso de tecnologías como la fertirrigación, considerando que el agua para riego es una de las principales limitantes en la producción agrícola en muchas de las más importantes áreas de cultivo del amaranto, y que contribuye de manera significativa en el uso óptimo de los nutrientes vegetales. Se conoce que el nitrógeno (N) es el elemento más restrictivo en el crecimiento del cultivo de amaranto y que a medida que el ambiente sea más favorable se deberá aplicar mayor cantidad de N (Stallknecht y Schulz-Schafer, 1993). Manzova y Reuben (1982) mencionan que un prerequisite para un alto rendimiento está relacionado con la habilidad del genotipo de amaranto para producir alta cantidad de materia seca total. Asimismo, la manera en la cual la materia seca producida es distribuida entre las diferentes partes de la planta determina el rendimiento económico. En invernadero, consistentemente la materia seca (MS) de todas las estructuras de la planta (raíz, tallo, hoja y panoja) se incrementan al aplicarse 250 ml de agua planta<sup>-1</sup>.

La fertirrigación es una técnica agrícola moderna que provee la excelente oportunidad de maximizar los rendimientos con menores volúmenes de agua, y a la vez reducir la contaminación ambiental (Hagin *et al.*, 2002), al incrementar la eficiencia de uso de los fertilizantes, minimizar la aplicación de éstos y aumentar los beneficios económicos de la inversión en fertilizantes. En la fertirrigación, el momento, las cantidades y la concentración de los fertilizantes aplicados puede ser mejor controlados.

En los dos experimentos de este estudio, las aplicaciones de las dosis de fertilizante durante el etapas fenológicas específicas, se realizó siguiendo el patrón propuesto por Sne (2006), según el cultivo, el tipo de sustrato y el sistema de manejo del cultivar; la dosificación proporcional. En este proceso se mantiene una relación constante y predeterminada entre el volumen de agua de riego y el volumen de solución fertilizante, cuyo resultado es una concentración constante de nutrimentos en el agua de riego. Lo anterior no ocurre en los sistemas de riego tradicional, como inundación o por surcos, donde un productor aplica el agua normalmente en grandes cantidades con intervalos de varios días, o aún semanas entre turnos de riego (y sin adicionar fertilizantes); lo que ocasiona que el buen desarrollo del cultivo de amaranto dependa en gran medida de la capacidad de retención de humedad del suelo y del suministro tradicional de fertilizantes; cuando se da. Se conoce que mediante el riego por goteo la productividad de un cultivo se potencializa al mantener la humedad aprovechable del suelo a capacidad de campo (CC), por lo que presenta la mayor eficiencia en el uso de agua por la planta de amaranto (Okunade *et al.*, 2009).

El volumen de raíces en el riego por goteo es relativamente pequeño, comparado con el que se tiene por lo regular bajo riego por surcos (Sagiv *et al.*, 1974). La raíz de la planta de *A. hypochondriacus* variedad Frondosa en invernadero y campo osciló entre 2.79 y 3.25 g planta<sup>-1</sup>; respectivamente, mientras que en *A. cruentus* variedad Dorada el peso de raíz fue de 3.39 a 3.98 g por planta. Esto muestra que los cultivos que crecen en sustratos inertes (fibra de coco) o en suelos arenosos pobres en fertilidad requieren un suministro continuo de agua y nutrimentos minerales durante su ciclo completo de crecimiento, desde la siembra o trasplante hasta la cosecha. Lo anterior fue la estrategia de manejo agronómico seguida en los dos experimentos para evaluar el rendimiento de los dos genotipos de amaranto, en campo e invernadero. Esto

explica que en el experimento en campo, el rendimiento en grano de *A. hypochondriacus* variedad Frondosa (155 %) y *A. cruentus* variedad Dorada (55 %) superasen al rendimiento medio ( $0.9 \text{ ton ha}^{-1}$ ) reportado en riego tradicional en el periodo otoño-invierno (SIAP, 2016). En invernadero, *A. hypochondriacus* variedad Frondosa ( $3720 \text{ kg ha}^{-1}$ ) superó a *A. cruentus* variedad Dorada ( $3020 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

El conocimiento básico del suministro de nutrimentos a cultivos bajo fertirrigación surge de los estudios iniciales de fisiología en nutrición de cultivos en medios hidropónicos (Benton-Jones, 1983). En los cultivos sin suelo e hidropónicos, la técnica consiste en reemplazar la totalidad de la solución nutritiva con soluciones frescas a intervalos periódicos. Este procedimiento, que fue utilizado en el experimento bajo condiciones de invernadero, aseguró que no se mostraran deficiencias de ningún nutrimento durante el ciclo de crecimiento del amaranto.

Para lograr algo similar en el experimento de amaranto en condiciones de campo, se procedió inicialmente a aplicar una fertilización nutrimental edáfica (de fondo) mediante abono orgánico en combinación con fertilizantes inorgánicos como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio. El objetivo de la incorporación del abono orgánico fue favorecer la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. Esta es una propiedad que tiene un papel importante en las reservas de nutrimentos disponibles para las plantas. Los iones provenientes de los fertilizantes inorgánicos son adsorbidos y están protegidos de la lixiviación y pueden liberarse para volverse disponibles para las plantas.

Posteriormente, la fertilización de fondo se complementó con la adición de fertilizantes en el agua de riego (fertirrigación), aplicada en 16 ocasiones durante el desarrollo del cultivo de amaranto. Por lo anterior, no se observaron plantas deficientes nutrimentalmente ni con daños por salinidad debido a una sobrefertilización. Una estrategia cercana a este método fue

desarrollada por Assouline *et al.* (2006), en pimiento cultivado en un suelo franco arenoso. El empleo de tal protocolo de cultivo de suministro continuo de nutrimentos en suelos arenosos en condiciones de campo podría resultar en un sobresuministro de nutrimentos que podría lixiviarse debajo de la zona radical y consecuentemente en contaminación con nitrato de las fuentes de agua subterráneas. Al comparar en condiciones de campo riegos diarios múltiples contra un riego una vez por día o una vez por semana, se encontró un aumento en la salinidad de las capas superiores de suelos en el primer caso (Bar-Tal *et al.*, 2006).

El manejo de la técnica de fertigación en los dos experimentos tuvo mayor similitud con la estrategia propuesta por Scaife y Bar-Yosef (1995). La estrategia de fertigación para cultivos de campo consiste en aplicar cantidades actuales diarias suministradas de agua y nutrimentos ajustados a la demanda por transpiración a medida que el cultivo crece y se desarrolla con el tiempo. Este procedimiento de cultivo es más amigable al ambiente, pero se requiere de un monitoreo diario por parte del agricultor para seguir la demanda de agua y nutrimentos.

En el experimento conducido en invernadero, el uso de una técnica de “alimentación diaria” con un sistema de riego por goteo localizado cerca del sistema radical de la planta permitió que los nutrimentos fueran aportados de manera igual a las dos variedades de amaranto y evidenció la capacidad de las plantas para absorber todos los nutrimentos, al mostrar mayores rendimientos de grano y forraje, y en otros componentes de rendimiento, en comparación con los obtenidos en campo bajo la técnica de fertigación. Un comportamiento similar fue reportado en maíz por Abura (2001).

Las diferencias en las variables medidas en las plantas de amaranto desarrolladas en condiciones de invernadero en fibra de coco (“bolis”) con respecto a las condiciones en campo resultaron evidentes y explicables. Las plantas que se cultivan en recipientes difieren de aquellas

que crecen a campo en varios aspectos. Los recipientes limitan el desarrollo de las raíces y, como consecuencia, los requerimientos de agua, oxígeno y nutrimentos son mucho más intensivos. Los medios de crecimiento pueden diferir ampliamente en sus propiedades químicas y físicas. Las propiedades químicas son el aspecto más importante que se debe tener en cuenta a la hora de establecer el régimen de fertigración, ya que el suelo y los sustratos inorgánicos inertes tienen requerimientos muy diferentes para el crecimiento del amaranto. El medio de crecimiento inerte se caracteriza por una CIC casi nula, no tiene capacidad buffer o reguladora y no provee nutrimentos. El sistema de fertigración para este tipo de sustrato debe ser muy similar al empleado en hidroponia, proveyendo todos los nutrimentos esenciales ausentes en el agua de irrigación. Se utilizan varios medios de cultivo naturales y artificiales adecuados a las condiciones específicas locales, tomando en consideración las propiedades físicas y químicas requeridas para el cultivo de la especie en cuestión. Sin embargo, la extracción de nutrimentos de una zona limitada de raíces en el cultivo sin suelo necesita de un continuo reemplazo de las reservas de nutrimentos; lo que fue considerado en este estudio, al aplicarse las distintas dosis en riego (y la fertigración) y su frecuencia de aplicación diaria. Al respecto, Silber *et al.* (2003) señalan que la reducción de rendimiento de un cultivo obtenida con el riego de baja frecuencia (y la fertigración) se asocia a una deficiencia de nutrimentos, antes que a una escasez de agua, y que el riego de alta frecuencia puede compensar la deficiencia de nutrimentos. Lo anterior explica que el nivel más alto de irrigación evaluado en invernadero ( $250 \text{ ml planta}^{-1}$ ) consistentemente tuvo la mejor respuesta en las variables: materia seca, área foliar, peso de raíz, biomasa fresca, rendimiento en grano, índices fisiológicos (TCA, TAN y la TCR), índice de cosecha y uso eficiente de agua, lo cual demuestra el potencial del uso de tecnologías como la fertigración.

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en la información obtenida en esta investigación, desarrollada tanto a cielo abierto como en invernadero, mediante tecnologías como el riego por goteo y la fertirrigación, se concluye lo siguiente:

1. La fertirrigación mejora la eficiencia de uso del agua de riego y fertilizante, es un método de precisión en la agricultura actual. Hubo un efecto positivo los dos genotipos de amaranto, al mejorar su producción de biomasa fresca, rendimiento en grano y uso eficiente del agua, en sus respectivos medio de cultivo.
2. La fertirrigación es una tecnología que permite el manejo del agua en la agricultura que suministra agua y fertilizantes simultáneamente mediante un sistema de riego por goteo, abasteciendo de nutrimentos al cultivo de amaranto al inyectar fertilizantes solubles conjuntamente con el agua directamente en las zonas de raíces de las plantas de amaranto.
3. Se demuestra que para maximizar la productividad del agua en el amaranto no es necesario el uso excesivo de agua de riego, sino que la prioridad debe ser dada al uso eficiente de este recurso, para mejorar los rendimientos.
4. El desarrollo del uso eficiente del agua en la agricultura no es solamente necesario sino también factible, siendo crítico para mejorar el rendimiento de grano y forraje del cultivo del amaranto y el uso eficiente del agua. Para obtener altos rendimientos y máximos ingresos en la producción comercial del amaranto, el óptimo manejo agua y fertilizantes es requerido.
5. Estudios previos se han enfocado a evaluar la eficiencia de lámina de riego y cantidad de fertilizante sobre el crecimiento, rendimiento y calidad del amaranto. Mientras que

en esta investigación se hizo necesario seleccionar combinaciones óptimas de fertirrigación y fertilización para mejorar las prácticas de manejo del agua y fertilizantes en la producción de amaranto.

6. Se generó información en los parámetros de crecimiento (índices fisiológicos y morfológicos) y en el manejo agronómico de esta especie, mediante un análisis de crecimiento de las plantas de amaranto, relacionada con la ecofisiología y la agronomía, con sus propios conceptos, términos y herramientas de cálculo.



## CAPÍTULO VII. LITERATURA CITADA

- Abalone, R., Cassinera, A., Gastón, A. y Lara, M.A. 2004. Some Physical Properties of Amaranth Seeds. *Biosystems Engineering*, 89: 109-117.
- Abbasi, D., Rouzbehan, Y. y Rezaei, J. 2012. Effect of harvest date and nitrogen fertilization rate on the nutritive value of amaranth forage (*Amaranthus hypochondriacus*). *Animal Feed Science and Technology*, 171: 6-13.
- Abura, L. 2001. Growth curves as a tool to understanding maize production in Uganda. M. Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem, Rehovot.
- Achigan-Dako, E.G., Sogbohossou, O.E. y Maundu, P. 2014. Current knowledge on *Amaranthus* spp.: research avenues for improved nutritional value and yield in leafy amaranths in sub-Saharan Africa. *Euphytica*, 197: 303-317.
- Adango, E., Onzo, A., Hanna, R., Atachi, P. y James, B. 2007. Mite pests of major importance on indigenous leafy vegetables in Benin: the search for appropriate control strategies. *Acta Horticulturae*, 752: 311-317.
- Adebooye, G.O., Sridhar, M.K.C. y Ipinmoroti, R.R. 2001. Potassium recovery from farm wastes for crop growth. *Communications in soil science and plant analysis*, 32: 2347-2358.
- Agrios, G.N. 1997. *Plant Pathology*. 4a ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Akanbi, W.B. y Togun, A.O. 2002. The influence of maize-stover compost and nitrogen fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of amaranth. *Scientia Horticulturae*, 93: 1-8.
- Akinola, A.A. y Eresama, P.C. 2009. Economics of amaranthus production under tropical conditions. *International Journal of Vegetable Science*, 16: 32-43.
- Akubugwo, I.E., Obasi, N.A., Chinyere, G.C. y Ugbo, A.E. 2007. Nutritional and chemical value of *Amaranthus hybridus* L. leaves from Afikpo, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 6: 2833-2839.
- Amin, I., Norazaidah, Y. y Emmy Hainida, K.I. 2006. Antioxidant activity and phenolic content of raw and blanched *Amaranthus* species. *Food Chemistry*, 94: 47-52.
- Andrasofszky, E., Szocs, Z., Fekete, S. y Jelenits, K. 1998. Evaluation of the nutritional value of the amaranth plant. I. Raw and heat-treated grain tested in experiments on growing rats. *Acta Veterinaria Hungarica*, 46: 47-59.

- Andriolo, J.L. y Falcão, L.L. 2000. Efeito da poda de folhas sobre a acumulação de materia seca e sua repartição para frutos do tomatero cultivado em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 8: 75-83.
- Arellano, M.A., Albarracín, G., Arce, S. y Mucciarelli, S. 2004. Estudio comparativo de hojas de *Beta vulgaris* con *Amaranthus dubuis Mart ex Thell*. *ΦYTON, Revista Internacional de Botánica Experimental*, 53: 193-197.
- Arellano, V.J.L. y Galicia, F.J.A. 2007. Rendimiento y características de planta y panoja de amaranto en respuesta a nitrógeno y cantidad de semilla. *Agricultura Técnica en México*, 33:251-258.
- Assouline, S., Moller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K. y Silber A. 2006. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: bell pepper case study. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1556-1568.
- Avasthi, K., Izui, K. y Raghavendra, S. 2011. Interplay of light and temperature during the in planta modulation of C4 phosphoenolpyruvate carboxylase from the leaves of *Amaranthus hypochondriacus* L.: diurnal and seasonal effects manifested at molecular levels. *Journal of Experimental Botany*, 62: 1017-1026.
- Ayala, G.A.V., Escobedo, L.D., Cortés, E.L. y Espitia, R E. 2012. El cultivo de amaranto en México, descripción de la cadena, implicaciones y retos, en: *Amaranto: ciencia y tecnología*. Espitia R E (ed.). Libro científico. Núm. 2. Ed. inifap/sinarefi, México.
- Ayodele, V.I. 2000. Influence of soil water stress at different physiological stages on growth and seed yield of *Amaranthus* species. *Acta Horticulturae*, 537: 767-772.
- Azcón-Bieto, J. y Talón, M. 2000. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. 2ed. Ed Interamericana McGraw-Hill, Madrid.
- Baginsky, C., Figueroa, V., González, A. y Silva, P. 2014. Efecto de la densidad de plantas y la fertilización nitrogenada en *Amaranthus cruentus* bajo condiciones de clima mediterráneo. Memoria Congreso Nacional de amaranto. Pasado, Presente y Futuro. Chapingo, México. pp. 11-17.
- Barba de la Rosa, A.P., Fomsgaard, I.S., Laursen, B. Mortensen, A.G., Olvera-Martínez, L., Silva-Sánchez, C., Mendoza-Herrera, A., González-Castañeda, J. y De León-Rodríguez A. 2009. Amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) as an alternative crop for sustainable food production: Phenolic acids and flavonoids with potential impact on its nutraceutical quality. *Journal of Cereal Science*, 49: 117-121.
- Barrales, J., Barrales, E. y Barrales E. 2010. *Amaranto. Recomendaciones para su producción*. Plaza y Valdés Editores, México.

- Barraza, F.V., Fischer, G. y Cardona, C.E. 2004. Estudio del proceso de crecimiento del cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Valle del Sinú medio, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 22: 81-90.
- Barrera, J., Suárez, D. y Melgarejo, L.M. 2010. Experiments in plant Physiology, Edition: First, Chapter: Chapter 2, Publisher: Universidad Nacional de Colombia, Editors: Luz Marina Melgarejo, pp.25-38
- Barrientos, E. 1988. Evaluación de necesidades de N, P y Mg en chile dulce, *Capsicum annum* L, asociado con café, *Coffea arabiga*, en siembra nueva. Tesis. Ingeniero Agrónomo Centro Regional de Occidente, Universidad de Costa Rica, Facultad de Agronomía, Escuela de Fitotecnia. 49 p.
- Bar-Tal, A., Aloni, B., Arbel, A., Barak, A., Karni, L., Oserovitz, J., Hazan, A., Gantz, S. Avidan, A., Posalski, I. y Keinan, M. 2006. Effects of evaporating cooling system on the incidence of blossom-end rot and fruit cracking in bell pepper (*capsicum annum* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 81:599-606.
- Bausch, W., Trout, T.J. y Buchleiter, G. 2010. Evapotranspiration estimates for deficit irrigated crops. En *Proceedings of the 5th Decennial National Irrigation Symposium*. Phoenix, AZ. Diciembre 5– 8, 2010. ASABE, St. Joseph MI.
- Beadle, C.L. 1988. Análisis del crecimiento vegetal. En: Coombs J, Hall D O, Long S P y Scurlock J M (eds.). *Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad*. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México. pp: 17-21.
- Becerra, R. 2000. El amaranto: nuevas tecnologías para un antiguo cultivo. *Biodiversitas*, 30: 1-6.
- Becker, R., Wheeler, E.L., Lorenz, K., Stafford, A.E., Grosjean, O.K., Betschart, A.A. y Saunders, R.M. 1981. A compositional study of amaranth grain. *Journal of Food Science*, 46:1175-1180.
- Belanger, J., Balakrishna, M., Latha, P., Katumalla, S. y Johns, T. 2010. Contribution of selected wild and cultivated leafy vegetables from South India to lutein and beta-carotene intake. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 19: 417-424.
- Benton-Jones, J. 1983. *A Guide for the Hydroponic and Soilless Culture Grower*. Timber Press. Univeristy of Minnesota.
- Bourges, H., Casanueva, E. y Rosado, J.L. 2009. Recomendaciones de ingestión de nutrimentos para la población mexicana. Bases fisiológicas. T2: Energía, proteínas lípidos, hidratos de carbono y fibra. Ed. Editorial Médica Panamericana, México.

- Brenner, D.M., Baltensperger, D.D., Kulakow, P.A., Lehmann, J.W., Myers, R.L., Slabbert, M.M. y Sleugh, B.B. 2000. Genetic resources and breeding of *Amaranthus*. *Plant Breeding Reviews*, 19: 227-285.
- Brenner, D.M. y Makus, D.J. 1997. 'Kerala Red' Ornamental Amaranth. *Hort Science*, 32: 749-750.
- Bresler, G., Vaamonde, G., Degrossi, C. y Fernandez, P.V. 1998. Amaranth grain as substrate for aflatoxin and zearalenone production at different water activity levels. *International Journal of Food Microbiology*, 42: 57-61.
- Bressani, R., Kalinowski, L.S., Ortiz, M.A. y Elías, L.G. 1987. Nutritional evaluation of roasted, flaked and popped *A caudatus*. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 37: 525-531.
- Bressani, R. y Ligorria, L. 1994. Effect of lime cooking of grain amaranth on selected chemical components and on its protein quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 42: 1998-2001.
- Brigelius-Flohé, R., Kelly, F.J., Salonem, J.T., Neuzil, J., Zingg, J.M. y Azzi, A. 2002. The European perspective on vitamin E: current knowledge and future research. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76: 703-716.
- Bugarín-Montoya, R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P. y García-Paredes, D. 2001. Acumulación diaria de materia seca y de potasio en la biomasa aérea total de tomate. *Terra*. 20: 401-409.
- Cai, Y.Z., Sun, M. y Corke, H. 2005. Characterization and application of betalain pigments from plants of the Amaranthaceae. *Trends in Food Science and Technology*, 16: 370-376.
- Calzetta, A.N., Aguerre, R.J. y Suarez, C. 2004. Drying characteristics of amaranth grain. *Journal of Food Engineering*, 65: 197-203.
- Carballo, A. 2006. Manual Gráfico para la descripción varietal en amaranto (*Amaranthus* spp). 1a ed. Ed Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Carlsson, R. 1980. Quantity and quality of amaranthus grain from plants in temperate, cold and hot subtropical climates-a review. En: Proc. Second Amaranth Conf. Rodale Press, Emmaus, PA.
- Carrero, J.M. 1996. Lucha integrada contra las plagas agrícolas y forestales. Mundi Prensa Libros, Madrid, España.
- Casierra-Posada, F., Barreto, V.E. y Fonseca, O.L. 2004. Crecimiento de frutos y ramas de duraznero (*Prunus persica* L. Batsch, cv. Conservero) en los altiplanos colombianos. *Agronomía Colombiana*, 22: 40-45.

- CAST. 1989. Mycotoxins. Economic and health risk. Task Force Report num 116. Ames, Iowa, E.U.
- Castro, D.P., Puyravaud, J.P. y Cornelissen, J.H.C. 2000. Leaf structure and anatomy as related to leaf mass per area variation in seedlings of a wide range of woody plant species and type. *Oecologia brasiliensis*, 124: 476-486.
- Chávez-Jáuregui, R.N., Cardoso-Santiago, R.A., Pinto e Silva, M.E. y Areas, J.A. 2003. Acceptability of snacks produced by the extrusión of amaranth and blends of chickpea and bovine lung. *International Journal of Food Science and Technology*, 38: 795-798.
- Chávez-Servín, J.L., Cabrera-Baeza, H.F., Jiménez-Ugalde, E.A., Mercado-Luna, A., de la Torre-Carbot, K., Escobar-García, K., Aguilera-Barreyro, A., Serrano-Arellano, J. y García-Gasca, T. 2017. Comparison of chemical composition and growth of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) between greenhouse and open field systems. *International Journal of Agriculture and Biology*, 19: 577-583.
- Clavijo, J. 1989. Análisis de crecimiento en malezas. *Revista Comalfi*, 15: 12-16.
- Coombs, J. y Hall, D.O. 1982. Whole Plant Photosynthesis and Productivity. In *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Pergamon Press, Oxford, 171 pp.
- Costa, P. y Giacomelli, G. 2005. Protected horticulture for tomato production in Mexico productivity based on technology alternative. VII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas. Mexicali, B.C. México.
- Costea, M. y DeMason, D.A. 2001. Stem morphology and anatomy in *Amaranthus* L. (Amaranthaceae)-taxonomic significance. *Journal Torrey Botanical Society*, 128(3): 254-281.
- Cristaudo, A., Gresta, F., Luciani, F. y Restuccia, A. 2007. Effects of after-harvest period and environmental factors on seed dormancy of *Amaranthus* species. *Weed Research*, 47: 327-334.
- Croft, M., Hallett, S. y Marshall, M. 2017. Hydroponic production of vegetable Amaranth (*Amaranthus cruentus*) for improving nutritional security and economic viability in Kenya. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 1-10.
- Curtis, P.S. y Läuchli, A. 1986. The role of leaf area development and photosynthetic capacity in determining growth of kenat under moderate salt stress. *Australian Journal of Plant Physiology*, 18: 553-565.
- Czaplicki, S., Ogrodowska, D., Derewiaka, D., Tańska, M. y Zadernowski, R. 2011. Bioactive compounds in unsaponifiable fraction of oils from unconventional sources. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113: 1456-1464.

- De la Cruz-Guzmán, G.H., Arriaga-Frías, A., Mandujano-Piña, M. y González-Moreno, S. 2010. Efecto de la sequía sobre algunas variables hídricas y morfométricas en cinco variedades de *Amaranthus*. Volumen 28, N° 3, Páginas 87-95 IDESIA (Chile) Septiembre – Diciembre.
- Demmler, D. 1998. Gründüngung zur Stabilisierung der Bodenfruchtbarkeit bzw zur Verringerung von N-Verlusten. Kartoffelbau, 49: 232-235.
- Díaz-Ortega, A.C. 1994. Análisis de crecimiento comparativo en tres poblaciones de *Amaranthus hypochondriacus* en el Municipio de Chalco, Edo. De México. Tesis. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de México. 141 p.
- Díaz-Ortega, A.C., Escalante-Estrada, J.A., Trinidad-Santos, A., Sánchez-García, P., Mapes-Sánchez, C. y Martínez-Moreno, D. 2004. Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. TERRA Latinoamericana, 22: 109-116.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. InfoStat 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Edwards, A.D. y Volack, B. 1980. Grain amaranth: optimization of field plant density. Proc. Of the second amaranth conference Kutztown PA. 13-14 sept. 1979. Rodale Research Center, Rodale Press, Emmaus PA.
- Ejieji, C.J. y Adeniran, K.A. 2010. Effects of water and fertilizer stress on the yield, fresh and dry matter production of grain amaranth (*Amaranthus cruentus* L.). Australian Journal of Agricultural Research, 1:18-24.
- Elbehri, A., Putnam, D.H. y Schmitt, M. 1993. Nitrogen Fertilizer and Cultivar Effects on Yield and Nitrogen-Use Efficiency of Grain Amaranth. Agronomy Journal, 85: 120-128.
- El-Sharkawy, M.A., Loomis, R.S. y Williams, W.A. 1968. Photosynthetic and Respiratory Exchanges of Carbon Dioxide by Leaves of the Grain Amaranth. Journal of Applied Ecology, 5: 243-251.
- Escalante, E.M.C. 2011. Rescate y revaloración del cultivo del amaranto. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Escalante-Estrada, J.A. y Kohashi-Shibata. 2015. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 84 p.
- Escudero, N.L., Albarracín, G., Fernández, S., Arellano, L.M. y Mucciarelli, S. 1999. Nutrient and antinutrient composition of *Amaranthus muricatus*. Plant Foods for Human Nutrition, 54: 327-336.

- Espitia, R.E. 1992. Amaranth germplasm development and agronomic studies in Mexico. *Food Reviews International*, 8:71-86.
- Espitia, R.E. 1991. Estabilidad del rendimiento en amaranto. *Memorias del Primer Congreso Internacional del Amaranto*. 22-27 septiembre, Oaxtepec, Morelos, México.
- Etchevers, B.J.D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra*. 17: 209-219.
- FAO. 1997. Revisado noviembre 2, 2017, en: <http://www.fao.org/Noticias/1997/971201-s.htm>
- Fasuyi, A.O., Dairo, F.A.S. y Olujimi, O.T. 2007. Protein supplementary quality of vegetable leaf meal (*Amaranthus cruentus*) in the diets of laying hens: Egg laying performance, egg quality and hematological implications. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 5: 294-300.
- Fitter, A.H. y Hay, R.K.M. 1987. *Environmental physiology of plants*. Academic Press. 2a ed, Londres.
- Flórez, V., Miranda, D., Chaves, B., Chaparro, L., Cárdenas, C. y Farías, A. 2006. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. En: Flórez, V., A. De la C. Fernández, D. Miranda, B. Chaves y J.M. Guzmán (eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Gallagher, J.N. y Biscoe, R.V. 1978. Radiation, absorption, growth and yield of cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 91: 47-60.
- Gamel, T.H., Linssen, J.P., Alink, G.M., Mesallam, A.S. y Shekib, L.A. 2004. Nutritional study of raw and popped seed proteins of *Amaranthus caudatus* L and *Amaranthus cruentus* L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84: 1153-1158.
- Gamel, T.H., Linssen, J.P., Mesallam, A.S., Damir, A.A. y Shekib, L.A. 2005. Effect of seed treatments of chemical composition and properties of two amaranth species: starch and protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85: 319-327.
- Gamel, T.H., Linssen, J.P., Mesallam, A.S., Damir, A.A. y Shekib, L.A. 2006. Effect of seed treatments on the chemical composition of two amaranth species: oil, sugars, fibres, minerals and vitamins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86: 82-89.
- García, J., Alejandre, G., Valdés, C.G.S y Medrano, H. 2010. *El Amaranto Investigación Agronómica en el Norte de México*. 1a Ed. Instituto Tecnológico del Valle Guadina.

- García-Pereyra, J., Aviña-Martínez, G.N., Rubio-Graciano, R.B., Medina-Medrano, R., Alvarado-Gómez, O. y Alejandre-Iturbide, G. 2016. Requerimiento de unidades calor en el cultivo del amaranto. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 5: 1411-1421.
- García-Pereyra, J., Valdés-Lozano, C., Olivares-Saenz, E., Alvarado-Gómez, O., Alejandre-Iturbide, G., Salazar-Sosa, E. y Medrano-Roldan, H. 2009. Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus* spp.) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. *Phyton, International Journal of Experimental Botany*, 78: 53–60.
- García-Pereyra, J., Valdés-Lozano, C., Olivares-Sáenz, E., Alvarado-Gómez, O., Medrano-Roldan, H. y Iturbide, G. 2004. Evaluación de genotipos de amaranto para adaptabilidad productiva en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27: 53-56.
- Gardner, F.P., Pearce, R.B., Mitchell, R.L. 1985. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Ames, Iowa, USA. 327 p.
- Garnier, E., Shipley, B., Roumet, C. y Laurent, G. 2001. A standardized protocol for the determination of specific leaf area and leaf dry matter content. *Functional Ecology*, 15: 688–695.
- Gelinas B. y Seguin P. 2007. Oxalate in Grain Amaranth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55: 4789-4794.
- Gimplinger, D.M., Schulte Auf'm Erley, G., Dobos, G. y Kaul, H.P. 2008. Optimum crop densities for potential yield and harvestable yield of grain amaranth are conflicting. *European Journal of Agronomy*, 28: 119-125.
- Goudriaan, J.Y. y Van Laar, H.H. 1995. *Modelling potential growth processes. Textbook with exercises*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands, 238 pp.
- Granados, D. y López, G. 1990. Chinampas y etnobotánica de la alegría (*Amaranthus hypochondriacus* L.). En: *El amaranto (Amaranthus spp.). Su cultivo y aprovechamiento*. Trinidad S A, Gómez F, Suárez G. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
- Greizerstein, E.J. y Poggio, L. 1995. Meiotic studies of spontaneous hybrids of *Amaranthus*: genome analysis. *Plant Breeding*, 114: 448-50.
- Guerra-Matias, A.C. y Arêas, J.A.G. 2005. Glycemic and insulinemic responses in women consuming extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L). *Nutrition Research*, 25: 815-822.



- Gupta, V.K. y Thimba, D. 1992. Grain amaranth: a promising crop for marginal areas of Kenya. *Food Reviews International*, 8:51-69.
- Haas, P.W. 1983. The effects of plant density on agronomic qualities of four species of grain amaranth. Rodale Research Center Report RRC/C-81-8. Rodale Press, Emmaus, PA.
- Hagin, J., Sneh, M. y Lowengart-Aycicegi, A. 2002. Fertigation – Fertilization through irrigation. IPI Research Topics No. 23. Ed. by A.E. Johnston. International Potash Institute, Basel, Switzerland.
- Hauptli, H. y Jain, S.K. 1978. Biosystematics and agronomic potential of some weedy and cultivated amaranths. *Theoretical and Applied Genetics*, 52: 177-185.
- Henderson, T.L., Johnson, B.L. y Schneiter, A.A. 2000. Row spacing, plant population, and cultivar effects on grain amaranth in the northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 92: 329-336.
- Henderson, T.L., Johnson, B.L. y Schneiter, A.A. 1998. Grain amaranth seeding dates in the northern great plains. *Agronomy Journal*, 90: 339-344.
- Hernández, E., García, E. y Ramírez J.L. 2014. Caracterización de suelos cultivados con amaranto y algunos aspectos agronómicos de la planta. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5: 421-431.
- Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany*, 83: 413-422.
- Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*, 77: 71-80.
- Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: measurements and simulation. *Annals of Botany*, 75: 369-379.
- Hunt, R. 1990. Basic growth analysis. Academic division of Unwin Hyman. London, 112 pp.
- Hunt, R. 1982. Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold Publishers, London. 248 p.
- Hunt, R. 1978. Plant growth analysis. Studies in biology No. 96. Edward Arnold Ed.
- Hyams, D. 2009. Curve Expert 1.4. A curve fitting system for Windows Double-precision.
- Igbokwe, P.E. y Hollins, S. 2000. Response of vegetable amaranth to plant spacing. *Journal of Vegetable Crop Production*, 6: 75-85.

- Ilo, S., Liu, Y. y Berghofer, E. 1999. Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *LWT - Food Science and Technology*, 32: 79-88.
- Iori, V., Pietrini, F., Cheremisina, A., Shevyakova, N.I., Radyukina, N., Kuznetsov, V.V. y Zacchini, M. 2013. Growth Responses, Metal Accumulation and Phytoremoval Capability in Amaranthus Plants Exposed to Nickel Under Hydroponics. *Water, Air and Soil Pollution*, 224: 1450.
- Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. y Liu, F. 2012. Improving crop production in the arid Mediterranean climate. *Field Crops Research*, 128: 34-47.
- Jacobsen, S. y Sherwood, S. 2002. Cultivo de granos andinos en Ecuador: informe sobre los rubros quinua chocho y amaranto. Quito: Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO.
- Jakubowska, M., Gardzielewska, J., Tarasewicz, Z., Szczerbińska, D., Karamucki, T., Rybak, K., Poławska, E. y Garczewska, J. 2013. The effect of amaranth seed added to the standard diet upon selected meat quality traits in the quail. *Animal Science Papers and Reports*, 31: 355-362.
- Joshi, B.D. y Rana, R.S. 1991. Grain Amaranths: the Future Food Crop. National Bureau of Plant Genetic Resources, New Delhi.
- Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P.F. y Donoghue, M.J. 2008. *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*. Ed Sinauer Associates, Inc. 4<sup>a</sup> ed, Sunderland, MA.
- Jurado-Rentería, R.A. 1998. Amaranto: su impotancia en la alimentación en México. (Tesis de licenciatura). Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Khaing, A.A., Moe, K.T., Chung, J.W., Baek, H.J. y Park, Y.J. 2013. Genetic diversity and population structure of the selected core set in Amaranthus using SSR markers. *Plant Breeding*, 132(2): 165-173.
- Klapwijk, D. 1986. Production of tomato transplants in The Netherlands. *Acta Horticulturae*, 190: 505-510.
- Kolodziej, B. 2006. Effect of mineral fertilization on ribwort plantain (*Plantago lanceolata* L.) yielding (in Polish). *Acta Agrophysica*, 141: 637-647.
- Kraujalis, P. y Venskutonis, P.R. 2013. Supercritical carbon dioxide extraction of squalene and tocopherols from amaranth and assessment of extracts antioxidant activity. *The Journal of Supercritical Fluids*, 80: 78-85.

- Krishnan, P., Evans, T.A. y Pill, W.G. 1994. Threshing cylinder speed affects germination of *Amaranthus cruentus* L. seeds. Hort Science, 29: 652–654.
- Kumar, J.K. y Sinha, A.K. 2004. Resurgence of natural colorants: a holistic view. Natural Product Research, 18: 59–84.
- Kyung, K.H., Jeong, K.M., Yon, C.H., Eun-Ki, K., Hoon, S.D. 2006. Antioxidant and antidiabetic effects of Amaranth (*Amaranthus cruentus*) in diabetic rat. Cell Biochemistry and Function, 24: 1.
- Lal, A. y Edwards, G.E. 1996. Analysis of inhibition of photosynthesis under water stress in the C4 species *Amaranthus cruentus* and *Zea mays*: electron transport, CO2 fixation and carboxylation capacity. Functional Plant Biology, 23:403–412.
- Lambers, H., Chapin, F.S. y Pons, T.L. 1998. Plant physiological ecology. Springer-Verlag, Berlin.
- Lanoue, K.Z., Wolf, P.G., Browning, S. y Hood, E.E. 1996. Phylogenetic analysis of restriction-site variation in wild and cultivated *Amaranthus* species (Amaranthaceae). Theoretical and Applied Genetics, 93(5-6): 722-732.
- Lee, J.H. y Heuvelink, E. 2003. Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut *Crysanthemum*. Annals of Botany, 91: 319-327.
- Legaria, J.P. 2010. Diversidad genética en algunas especies de amaranto (*Amaranthus* spp.). Revista fitotecnia mexicana, 33(2): 89-95.
- Lehmann, J., Putnam, D. y Qureshi, A. 1994. Vitamin E isomers in grain amaranths (*Amaranthus* spp.). Lipids, 29: 177-181.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T.A. y Rintala, J.A. 2008. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. Biomass and Bioenergy, 32: 541-550.
- Li, N.Y., Lu, H.P., Li, Z.A., Zhuang, P. y Qiu, J. 2010. Tolerance and Accumulation of admium in Soil by *Amaranthus hypochondriacus* L. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 16: 028–032
- Liu, F. y Stützel, H. 2004. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. Scientia Horticulturae, 102: 15-27.
- Liu, F. y Stützel, H. 2002 a. Leaf expansion, stomatal conductance, and transpiration of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. Journal of the American Society for Horticultural Science, 127: 878-83.

- Liu, F. y Stützel, H. 2002 b. Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. *European journal of agronomy*, 16: 137-150.
- Lusk, C.H. 2002. Leaf area accumulation helps juvenile evergreen trees tolerate shade in temperate rain forest. *Oecologia brasiliensis*, 132: 188-196.
- Macler, A. y MacElroy, D. 1989. Productivity and food value of *Amaranthus cruentus* under non-lethal salt stress. *Advances in Space Research*, 9: 135-139.
- Maharwal, J., Samarth, R.M. y Saini, M.R. 2003. Radiomodulatory influence of Rajgira (*Amaranthus paniculatus*) leaf extract in Swiss albino mice. *Phytotherapy Research*, 17: 1150-1154.
- Majewski, Z., Chlebowski, J., Sypula, M. y Wierzbicki, D. 1994. Application of standard agricultural machinery to harvesting and post-harvest handling amaranth. *Acta Horticulturae*, 355: 95-98.
- Maldonado, C.E. 2014. Análisis proteínico del grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus*) y obtención del mapa proteómico de *Amaranthus cruentus*. Tesis Doctorado, IPICYT. En línea, consultado 15/10/2017. <http://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/2897>.
- Mallory, M.A., Hall, R.V., McNabb, A.R., Pratt, D.B., Jellen, E.N. y Maughan, P.J. 2008. Development and characterization of microsatellite markers for the grain amaranths. *Crop Science*, 48:1098–1106.
- Mamata, B., Narayanasamy, G. y Biswas, D.R. 2004. Phosphorus suppling capacity of phosphate rocks as influenced by compaction with water soluble p fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68: 73–84.
- Manzova, N. y Reuben, S.O. 1982. Dry matter partitioning in *Amaranthus cruentus* in response to population density. Dar-e-Salaum Univ. Moragord, Tanzania, *Beitrag Zur Tropischen Landwirts Chft and Veterinar medizin* 20: 131-134.
- Mapes, C., Díaz-Ortega, A., Collazo, M. y Bye, R. 1995. Desarrollo de cinco razas de amaranto (*Amaranthus* spp.) en Chalco, Estado de México. *Anales del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México*, 66: 149-169.
- Martínez, M.J. 1998. Descripción fenológica y evaluación de fuentes de fertilización del cultivo de amaranto en Cuautitlán Izcalli, México. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Martínez-Moreno, D., Núñez-Farfan, J., Terrazas, T., Mar, R.P., Trinidad-Santos, A., Trejo, L.C. y Larque-Saavedra, A. 1999. Plastic responses to clipping in two species of

- Amaranthus from the Sierra Norte de Puebla, Mexico. Genetic Resources and Crop Evolution, 46: 225-234
- Materechera, S.A. y Mukwevho, T.N. 2007. Response of leaf amaranth (*Amaranthus cruentus*) to nitrogen from chicken manure and defoliation frequency in a semi-arid environment of South Africa. Acta Horticulturae, 752: 499-504.
- Matteucci, S.D. y Colma, A. 1997. Agricultura sostenible y ecosistemas áridos y semiáridos de Venezuela. Interciencia, 22: 123-130.
- Mendoza, M.C. y Bressani, R. 1987. Nutritional and functional characteristics of extrusión-cooked amaranth flour. Cereal Chemistry, 644: 218-222.
- Miguel-Chávez, R.S., Hernández-Sequera, V., Rosas-Calleja, D., Trinidad-Santos, A. y Larqué-Saavedra, A. 1999. Efecto del potasio sobre la conductancia estomática y contenido de clorofila en amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Revista Chapingo Serie Horticultura, 5: 19-22.
- Mihail, J.D. y Champaco, E.R. 1993. Diseases of *Amaranthus* spp. caused by *Pythium aphanidermatum* and *Macrophomina phaseolina*. Canadian Journal of Botany, 71: 1219-1223.
- Milthorpe, F.L. y Moorby, J. 1982. An Introduction to Crop Physiology. Cambridge University Press. UK. 202 p.
- Mnzava, N.A. y Masam, A.M. 1985. Regeneration potential, leaf and seed yield of vegetable amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) as a function of initial topping heights. Acta Horticulturae, 153: 151-160.
- Monteros, J.C., Nieto, C., Caicedo, C., Rivera, M. y Vimos, C. 1994. Iniap-alegría. Primera variedad mejorada de amaranto para la sierra ecuatoriana. Quito, Ecuador, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Boletín Divulgativo, 245.
- Moose, S.P. y Mumm, R.H. 2008. Molecular plant breeding as the foundation for 21st century crop improvement. Plant Physiology, 147: 969-977.
- Morales, D. 1999. Nutrición del cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.): Dinámica nutrimental, fertigración nitrogenada y fertilización basal. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados. 71 p.
- Morales, J., Babinsky, V., Bourges, H. y Camacho, M.E. 2000. Tablas de composición de alimentos mexicanos. Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición Salvador Zubirán, Dirección de Nutrición, Departamento de Ciencias y Tecnologías de los Alimentos, México.

- Morales, J., Vázquez, N. y Bressani, R. 2014. El amaranto Características y aporte nutricional. Ed. Trillas. 2a ed, México.
- Moreno, D.R. 1978. Recopilación de datos para análisis químicos de suelos y de aguas. Coord. Nal. De Labs. de Servicio e Investigación. INIA. SARH. México.
- Moshaver, E., Madani, H., Emam, Y., Mohamadi, G.N. y Sharifabad H.H. 2016. Effect of planting date and density on amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) growth indices and forage yield. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 5: 542-547.
- Mujica, A. 1992. Granos y leguminosas andinas. En: Cultivos marginados, otra perspectiva de 1492. Eds. Hernández-Bermejo J E, León J. Ed. FAO 1a ed. Roma.
- Mujica, A. y Berti, M. 1997. El Cultivo del Amaranto (*Amaranthus* spp.): Producción, Mejoramiento Genético y Utilización. FAO, UNA-PUNO, UDEC-Concepción. Roma, Italia.
- Munns, R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environ*, 25: 239–250.
- Munns, R. 2005. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytol*, 167: 645-63.
- Myers, R.L. 1998. Nitrogen Fertilizer Effect on Grain Amaranth. *Agronomy Journal*, 90:597-602. National Academy Press. 1984. Amaranth modern prospects for an ancient crop. Washington, DC, EU: National Research Council, Advisory Committee on Technology Innovation, Ad Hoc Panel.
- Newmark, H L. 1997. Squalene, olive oil, and cancer risk: a review and hypothesis. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, 12: 1101-1103.
- Nielsen, T.H. y Veierskov B, 1998. Distribution of dry matter in sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) during the juvenile and generative growth phases. *Scientia Horticulturae*. 35:179-187.
- Nieto, C. 1990. El cultivo de amaranto (*Amaranthus* spp) una alternativa agronómica para Ecuador. INIAP, EE. Publicación Miscelánea N° 52 28.
- Oboh, G., Raddatz, H. y Henle, T. 2008. Antioxidant properties of polar and non-polar extracts of some tropical green leafy vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88: 2486-2492.
- Ochoa-Sánchez, J.C., Parra-Cota, F.I., Avina-Padilla, K., Delano-Frier, J. y Martínez-Soriano, J.P. 2009. *Amaranthus* spp.: a new host of "*Candidatus phytoplasma aurantifolia*". *Phytoparasitica*, 37: 381-384.

- Ohshiro, M., Hossain, M.A., Nakamura, I., Akamine, H., Tamaki, M., Bhowmik, P.C. y Nose, A. 2016. Effects of soil types and fertilizers on growth, yield, and quality of edible *Amaranthus tricolor* lines in Okinawa, Japan. *Plant Production Science*, 19: 61-72.
- Ojo, O.D., Kintomo, A.A., Akinrinde, E.A. y Akoroda, M.O. 2007. Comparative effect of phosphorus sources for grain amaranth production. *Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38: 35-55.
- Okigbo, B.N. 1969. Maize experiments on the Nsukka Plains. II. Effects of different kinds of mulch on the yield of maize in the humid tropics. *L'Agron. Trop.*, 28: 1036-1047.
- Okunade, D.A., Olanusi, O.A. y Adekalu, K.O. 2009. Growth, yield, and economics of okra and amaranth production under irrigation. *International Journal of Vegetable Science*, 15: 28-43.
- Olofintoye, J.A.T., Abayomi, Y.A. y Olugbemi, O. 2015. Yield responses of grain amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) varieties to varying planting density and soil amendment. *African Journal of Agricultural Research*, 10: 2218-2225.
- Olsen, K.M. y Wendel, J.F. 2013. A bountiful harvest: genomic insights into crop domestication phenotypes. *Annual Review of Plant Biology*, 64: 47-70.
- Oya, K., Tokashiki, Y. y Ishimine, Y. 1977. Effects of potassium fertilization on the yields of sweet potato autumn crop grown on a calcareous soil of Okinawa. *Science Bulletin of the Collage of Agriculture*, 24: 191-197.
- Paredes, L.O., Barba, A.P., Hernández, L.D. y Cárabez, T.A. 1990. Amarantho. Características alimentarias y aprovechamiento agroindustrial. Washington, D.C., E.U: Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos-Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- Paredes-López, O., Guevara-Lara, F. y Bello-Pérez, A. 2006. Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. Ed. Fondo de Cultura Económica. 1a ed, México.
- Parra, C.F.I. y Délano, F.J.P. 2012. Uso de bacterias promotoras de crecimiento vegetal para aumentar la productividad de amaranto de grano, en: *Amaranto: ciencia y tecnología* Espitia R.E. (ed.). Libro científico. Núm. 2. Ed. inifap/sinarefi, México.
- Parra-Cota, F.I., Peña-Cabriales, J.J., de los Santos-Villalobos, S., Martínez-Gallardo, N.A. y Délano-Frier, J.P. 2014. *Burkholderia ambifaria* and *B. caribensis* Promote Growth and Increase Yield in Grain Amaranth (*Amaranthus cruentus* and *A. hypochondriacus*) by Improving Plant Nitrogen Uptake. *PLoS ONE*, 9: 88-94.

- Paško, P., Bartoń H., Zagrodzki P, Chłopicka J, Iżewska A, Gawlik M, Gawlik M y Gorinstein S. 2011. Effect of amaranth seeds in diet on oxidative status in plasma and selected tissues of high fructose-fed rats. *Food Chemistry*, 126: 85-90.
- Paško, P., Bartoń, H., Zagrodzki, P., Gorinstein, S., Fołta, M. y Zachwieja, Z. 2009. Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food Chemistry*, 115: 994-998.
- Pereyra, G.J., Valdés, L.C.G.S., Olivares, S.E., Alvarado, G.O., Medrano, R.H. y Alejandre, I.G. 2004. Evaluación de variedades de amaranto para adaptabilidad productiva en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27: 53-56.
- Phogat, B.S., Bhalla, S. y Mal, B. 1994. Seasonal incidence of stem weevil (*Hypolyxus truncatulus*) and its effect on growth and grain yield of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*). *Indian Journal of Agricultural Science*, 64: 261-262.
- Písaříková, B., Zralý, Z., Kracmar, S., Trckova, M., Herzig, I. 2006. The use of amaranth (genus *Amaranthus* L.) in the diets for broiler chickens. *Veterinari Medicina*, 51: 399-407.
- Písaříková, B., Zralý, Z., Kracmar, S., Trckova, M. y Herzig, I. 2005. Nutritional value of amaranth (genus *Amaranthus* L.) grain in diets for broiler chickens. *Czech Journal of Animal Science.*, 50: 568-573.
- Pond, W.G. y Lehmann, I.W. 1989. Nutritive Value of a Vegetable Amaranth Cultivar for Growing Lambs *Journal of Animal Science*, 67: 3036-3039.
- Poorter, H. 1989. Plant growth analysis: towards a synthesis of the classical and the functional approach. *Physiologia Plantarum*, 75: 237-244.
- Pospisil, A., Pospisil, M., Varga, B. y Svecnjak, Z. 2006. Grain yield and protein concentration of two amaranth species (*Amaranthus* spp.) as influenced by the nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, 25: 250-253.
- Radford, P.J. 1967. Growth analysis formule. Their use and abuse. *Crop Science*, 7: 171-175.
- Radosavljevic, M., Jane, J. y Johnson, L.A. 1998. Isolation of amaranth starch by diluted alkaline-protease treatment. *Cereal Chemistry*, 75: 212-216.
- Radosevich, S.R. y Holt, J. 1984. World ecology, implications for vegetation management. Jhon Willey and Sons. New York, pp 25-32.
- Radostits, O.M., Gay, C.C., Blood, D.C. y Hinchcliff, K.W. 2000. *Veterinary Medicine*, 9th Ed. ELBS Bailliere Tindall, Londres, Reino Unido.



- Raj, S., Snehi, S., Khan, M., Tiwari, A. y Rao, G. 2010. Detection of Ageratum enation virus from cat's whiskers (*Cleome gynandra* L.) with leaf curl symptoms in India. *Journal of General Plant Pathology*, 76: 292–294.
- Ramírez, M.L. 2010. Calidad física y fisiológica en la semilla e industrial en el grano de *Amaranthus. hypochondriacus* en la fertilización y densidad de población. (Tesis de doctorado). Recursos genéticos y productividad, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Ramírez-Vázquez, M.L., Espitia-Rangel, E., Carballo-Carballo, A., Zepeda-Bautista, R., Vaquera-Huerta, H. y Córdova-Téllez, L. 2011. Fertilización y densidad de plantas en variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6: 855-866.
- Rao, C.V., Newmark, H.L. y Reddy, B.S. 1998. Chemopreventive effect of squalene on colon cancer. *Carcinogenesis*, 19: 287-290.
- Reinaudi, N.B., Repollo, R., Janovská, D., Délamo Frier, J. y Martín de Troiani, R. 2011. Evaluación de genotipos de amaranto (*Amaranthus* spp.) para la adaptabilidad productiva en el área de la Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de la Pampa, Argentina. *Revista Científica UDO Agrícola*, 11: 50-57.
- Reyna, T.T. 1991. Caracterización edafoclimática de las regiones potencialmente útiles para el cultivo del amaranto *Amaranthus* spp. Informe técnico. Reunión Anual del grupo de investigación Interdisciplinaria para el estudio del Amaranto. Universidad Nacional Autónoma de México, Programa Universitario de Alimentos, México.
- Reyna, T.T., Fernández, J.M., López, D. y Hernández, A.L. 1997. Zonificación pluviotérmica para el cultivo del *Amaranthus* spp. en la provincia de Pinar del Río e Isla de la Juventud, Cuba. *Investigaciones Geográficas Boletín*, 35: 135-152.
- Rezaei, J., Rouzbehan, Y., Fazaeli, H. y Zahedifar, M. 2013. Carcass characteristics, non-carcass components and blood parameters of fattening lambs fed on diets containing amaranth silage substituted for corn silage. *Small Ruminant Research*, 114: 225-232.
- Rivelli, A.R., Gherbin, P., De Maria, S. y Pizza, S. 2008. Field evaluation of *Amaranthus* species for seed and biomass yields in Southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*. 3:225-9.
- Rodríguez, L. 2000. Densidad de población vegetal y producción de materia seca. *Revista COMALFI*, 27: 31-38.
- Rodríguez-Kabana, R., King, P., Robertson, D. y Weaver, C. 1988. Potential of crops uncommon to alabama for management of root-knot and soybean cyst nematodes. *Journal of Nematology*, 20: 116-120.

- Rosales, R.G. 1999. Evaluación del proyecto de inversión de una agroindustria de amaranto. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Rosegrant, M.W., Msangi, S., Ringler, C., Sulser, T.B., Zhu, T. y Cline, S.A. 2008. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model description. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute.
- Russo, J. 2009. The role of the crop phenology in agricultural decision making. 94th Ecological Society of America Annual Meeting. 2p.
- Sadiku, N.A. y Sadiku, I.B.S. 2012. Indigenous Efforts by African Farmers in Ensuring Sustainability in Agricultural Productivity in the Face of Changing Climate. COLERM Proceedings, 1: 23-32.
- Sagiv, B., Ben-Asher, J., Bar-Yosef, B., Kafkafi, U. y Goldberg, D. 1974. "Combined irrigation and fertilization of tomatoes grown on sand dunes. Symposium IsraelFrance on ecological research on development of arid zones (Mediterranean deserts) with winter precipitation". Special Publication, 39, Dept. of Scientific publications ARO, Volcani Center, Bet Dagan (Israel).
- Salisbury, F.B. y Ross, C.W. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericano. S.A. de C.V. México. pp. 759.
- Sánchez, M.A. 1980. Potencial agroindustrial del Amaranto. Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo. México, D.F.
- SAS Institute Inc. 2008. Base SAS® 9.2 Procedures Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sauer, J.D. 1950. The grain amaranths: A survey of their history and classification. Annals of the Missouri Botanical Garden, 37: 561–619.
- Sauer, J.D. 1976. Grain amaranths. En "Evolution of Crop Plants". Simmonds N W Ed., Longman, London.
- Sauer, J.D. 1993. Historical geography of crop plants: a select roster. CRC press. Los Angeles, E U.
- Savage, G.P., Vanhanen, L., Mason, S.M. y Ross, A.B. 2000. Effect of Cooking on the Soluble and Insoluble Oxalate Content of Some New Zealand Foods. Journal of Food Composition and Analysis, 13: 201-206.
- Scaife, A. y Bar-Yosef, B. 1995. Fertilizing for High Yield and Quality Vegetables: Nutrient and Fertilizer Management in Field Grown Vegetables. IPI-Bulletin No 13. Internatl. Potash Institute, Basel, Switzerland p 104.

- Schmidt, D. 1977. Grain amaranth: A look at some potentials. En "Proceedings of the First Amaranth Conference". Rodale Press, Emmaus, PA.
- Schmidt, D.R., MacDonald, H.A. y Kelly, W.C. 1974. Solubility of iron, calcium and magnesium in amaranth and collard leaves. *Qualitas Plantarum*, 23: 373-378.
- Schwartz, D. y Kläring H.P. 2001. Allometry to estimate leaf area of tomato. *Journal of Plant Nutrition*. 24: 1291-1309.
- Seguin, P., Mustafa, A.F., Donnelly, D.J. y Gélinas, B. 2013. Chemical composition and ruminal nutrient degradability of fresh and ensiled amaranth forage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93: 3730-3736.
- Senft, J.P. 1979. Protein Quality of Amaranth Grain. *Proceeding of Second Amaranth Conference Rodale Press*.
- Seppälä, M., Laine, A. y Rintala, J. 2013. Screening of novel plants for biogas production in northern conditions. *Bioresource Technology*, 139: 355-362.
- Seppälä, M., Pyykkönen, V., Laine, A. y Rintala, J. 2012. Methane production from maize in Finland – screening for different maize varieties and plant parts. *Biomass and Bioenergy*, 46: 282–290.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2016. Revisado marzo 24, 2017, en: <http://www.siap.gob.mx/>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2017. Atlas agroalimentario. 1a edición, Ciudad de México. [Consultado 27 noviembre 2017]. Disponible en: <http://online.pubhtml5.com/clsi/ibhs/#p=4>.
- Shibles, R. 1987. *Crop physiology*. Iowa, USA, Iowa State University. 214 p.
- Shulka, S. y Singh, S.P. 2000. Studies on genetic parameters in vegetable amaranths. *Journal of Genetics and Breeding*, 54: 133-135.
- Silber, A., Xu, G., Levkovitch, I., Soriano, S., Bilu, A. y Wallach, R. 2003. High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and Soil*, 253: 467-477.
- Sistema Producto Amaranto del Distrito Federal. 2006. Revisado abril 28, 2017 en: <http://www.amarantodf.com.mx/>.
- Skwarylo-Bednarz, B. y Krzepilko, A. 2008. Effect of various NPK fertilizer doses on total antioxidant capacity of soil and amaranth leaves (*Amaranthus cruentus* L.). *International Agrophysics*, 23: 61-65.

- Sne, M. 2006. Micro irrigation in arid and semi-arid regions. Guidelines for planning and design. Ed.: S. A. Kulkarni. ICID-CIID. International Commission on Irrigation and Drainage, Nueva Delhi (India).
- Snyder, R.L. 1985. Hand calculating degree-days. *Agricultural and Forest Meteorology* 35: 353-358.
- Spreeth, M.H., Slabbert, M.M., De Ronde, J.A., Van Den HeeVere y Ndou, A. 2004. Screening of cowpea, bambara groundnut and amaranthus germplasm for drought tolerance and testing of the selected plant material in participation with targeted communities. WRC report. 1: 184-188.
- Srivastava, S., Bisht, H., Sidhu, O.P., Srivastava, A., Singh, P.C., Pandey, R.M., Raj, S.K., Roy, R. y Nautiyal, C.S. 2012. Changes in the metabolome and histopathology of *Amaranthus hypochondriacus* L. in response to Ageratum enation virus infection. *Phytochemistry*, 80: 8-16.
- Stallknecht, G.F. y Schulz-Schaeffer, J.R. 1993. Amaranth rediscovered. *New crops*. Janick J y Simon J E. (eds). 1a ed. Ed Jonh Wiley and Sons, Nueva York, 211-218.
- Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomasswater productivity. *Irrigation Science*, 25:189–207.
- Stetter, M., Müller, T. y Schmid, K. 2017. Genomic and phenotypic evidence for an incomplete domestication of South American grain amaranth (*Amaranthus caudatus*). *Molecular Ecology*, 26(3): 871-886.
- Steward, F.C.1969. Analysis of growth. Behavior of plants and their organs physiology. New York Academic press. pp 38-41.
- Sumar, K.L. 1982. *Amaranthus caudatus* El Pequeño Gigante. (Tercer Congreso Internacional de Cultivos Andinos, La Paz) Universidad Nacional el Cusco, Perú. Centro de Investigaciones de Cultivos Andinos.
- Sumar, K. 1993. La kiwicha y su cultivo. Centro de Estudios Regionales Andinos. Universidad Nacional del Cusco.
- Suresh, R., Gopinath, S., Govindaraju, K., Devika, T. y SuthanthiraVanitha, N. 2014. “GSM based Automated IrrigationControl using Raingun Irrigation System”. *International Journalof Advanced Research in Computer and CommunicationEngineering*, Vol. 3.
- Taboada, M. y Guadarrama, R.O. 2007. Potencialidad agroclimática para el cultivo de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) en el estado de Morelos, México. *Investigación Agropecuaria*, 4: 123-136.

- Taiwo, M.A. y Owolabi, A.T. 2004. Occurrence and prevalence of viruses of leafy vegetables in Lagos, Nigeria. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 10: 61-67.
- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. *Plant physiology*. Ed. Sinauer Associates. 6a ed. Sunderland, Massachusetts, E.U.
- Tang, S., Chen, Z., Li, H. y Zheng, J. 2003. Uptake of  $^{134}\text{Cs}$  in the shoots of *Amaranthus tricolor* and *Amaranthus cruentus*. *Environmental Pollution*, 125: 305-312.
- Tapia, M. 2000. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. Ed Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 2da ed, Santiago de Chile.
- Tapia-Blácido, D.R., do Amaral Sobral, P.J. y Menegalli, F.C. 2011. Optimization of amaranth flour films plasticized with glycerol and sorbitol by multi-response analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 44: 1731-1738.
- Teasdale, J.R. y Abdul-Baki, A.A. 1997. Growth analysis of tomatoes in black polyethylene and hairy vetch production systems. *Hort Science*, 32: 659-663.
- Teri, J.M. y Mlasani, D.K. 1994. Choanephora blight and alternaria leaf spot of Amaranth in Tanzania. *Plant Pathology*, 43: 228-229.
- Thanapornpoonpong, S.N., Vearasilp, S., Pawelzik, E. y Gorinstein, S. 2008. Influence of Various Nitrogen Applications on Protein and Amino Acid Profiles of Amaranth and Quinoa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56: 11464-11470.
- Thompson, T. 2001. Case problem: questions regarding the acceptability of buckwheat, amaranth, quinoa, and oats from a patient with celiac disease. *Journal of The American Dietetic Association*, 101: 586-587.
- Thompson, T.L., Deorge, T.A. y Godin, R.E. 2000. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: I. Plant response. *Soil Science Society of American Journal*, 64: 406-411.
- Tillman, P.B. y Waldroup, P.W. 1987. Effects of feeding extruded grain amaranth to laying hens. *Poultry Science*, 66: 1697-1701.
- Tillman, P.B. y Waldroup, P.W. 1988. Performance and yields of broilers fed extruded grain amaranth and grown to market weight. *Poultry Science*, 67:743-749.
- Torres-Saldaña, G., Trinidad-Santos, A., Reyna-Trujillo, T., Castillo-Juárez, H., Bautista-Martínez, N. y León-González, F. 2004. Barrenación del tallo de amaranto por *Hypolixus truncatulus* (Coleoptera: Curculionidae) y *Amauromyza abnormalis* (Diptera: Agromyzidae). *Acta Zoológica Mexicana*, 20: 131-140.

- Torres, S.G., Trinidad, S.A., Reyna, T.T., Castillo, J.H., Escalante, E.A. y León, G.F. 2006. Respuesta de variedades de amaranto a densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29: 307-312.
- Tosi, E.A, Ré, E., Lucero, H. y Masciarelli, R. 2001. Dietary fiber obtained from amaranth (*Amaranthus cruentus*) grain by differential milling. *Food Chemistry*, 73: 441-443.
- Tosi, E.A., Ré, E., Masciarelli, R., Sánchez, H., Osella, C. y De la Torre, M.A. 2002. Whole and defatted hyperproteic amaranth flours tested as wheat flour supplementation in mold breads. *LWT - Food Science and Technology*, 35: 472-475.
- Trinidad, S.A., Gómez, F. y Suárez, G. 1990. El amaranto (*Amaranthus* spp). Su cultivo aprovechamiento. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados.
- Tsakiris, G.P. 1982. A Method of applying crop sensitivity factors in Irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 5:335- 343.
- Vaieretti, M.V., Diaz, E., Ville y Garnier, E. 2007. Two measurement methods of leaf dry matter content produce similar results in a broad range of species. *Annals of Botany*, 99: 955–958.
- Valladares, F. y Sánchez-Gómez, D. 2006. Ecophysiological traits associated with drought in Mediterranean tree seedlings: individual responses versus interspecific trends in eleven species. *Plant Biology*, 8: 688-697.
- Van den Heever, E. y Venter, S.L. 2007. Evaluation of *amaranthus* sp. as a dual purpose crop, using the leaves and grain in South Africa. *Acta Horticulturae*, 752: 339-344.
- Van Heemst, H.D.J. 1988. Plant data values required for simple crop growth processes. Kluwer Academic Publishers. Netherlands 119 p.
- Vargas, M.F. 2002. Taller de cultivos extensivos. Amaranto. Informe histórico. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 65-67.
- Velasco, A.M. 2016. Los cuerpos divinos, el amaranto: comida ritual y cotidiana. *Arqueología Mexicana*, 138(23): 21.
- Videira, L.B., Pastor, M.D., Lorda, G., Iriarte, L. y Balatti, P.A. 2002. *Sinorhizobium fredii* cultured in media supplemented with *Amaranthus cruentus* L. seed meal and bacterial cell survival in liquid and peat based inoculum. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 18: 193-199.
- Wanjura, D.F. y Upchurch, D.R. 2000. Canopy temperature characterizations of corn and cotton water status. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 43: 867-875.

- Wassom, J.J. y Tranel, P.J. 2005. Amplified fragment length polymorphism-based genetic relationships among weedy *Amaranthus* species. *Journal of Heredity*, 96(4):410–416.
- Watson, D. 1952. The Physiological Basis of Variation in Yield. *Advances in Agronomy*, 4:101-145.
- Watson, D. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. *Annals of Botany*, 11: 41–76.
- Xolalpa, V.F.J. 1990. *Práctica regional del cultivo del amaranto en Tulyehualco, Xochimilco, D.F. Chapingo, México: Colegio de Posgraduados.*
- Yoshida, S. 1972. Physiological aspects of grain yield. *Annual Review of Plant Physiology*, 23: 437-64.
- Zhu, F., Cai, Y., Sun, M. y Corke, H. 2008. Influence of *Amaranthus* betacyanin pigments on the physical properties and color of wheat flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56: 8212-8217.