



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR**

**TESIS DOCTORAL EN CIENCIAS AGRARIAS**

**Comportamiento del cultivo de amaranto en el Valle Inferior del Río Negro, Argentina.  
Optimización de las condiciones del cultivo**

**María Fany Zubillaga**

**Bahía Blanca**

**Argentina**

**2017**

*Dedicada: A mi ejemplo de vida, mi mamá*

*y a mi hija Sofía*

## PREFACIO

---

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctora en Ciencias Agropecuarias, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito de la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro convenio INTA-Provincia de Río Negro, Universidad Nacional de Río Negro y las determinaciones se realizaron en el laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, durante el período comprendido entre el 3 de Noviembre de 2010 y el 21 de junio de 2017. La misma se desarrolló bajo la dirección del Dr. Gustavo Adolfo Orioli, Profesor Consulto de la UNS e Investigador Principal del CONICET y la codirección del Dr. Daniel Alejandro Barrio, investigador Adjunto de CONICET y Profesor Asociado de la cátedra de Química Biológica y Química Agrícola en la carrera de Ingeniería Agronómica de la Sede Atlántica de la UNRN.

Ma. Fany Zubillaga



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR  
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el 20/12/2017, mereciendo la calificación de 10 (*diez*).

## COMPORTAMIENTO DEL CULTIVO DE AMARANTO EN EL VALLE INFERIOR DEL RÍO NEGRO. OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL CULTIVO

---

### RESUMEN

El cultivo de amaranto (*Amaranthus sp*) se visualiza como una producción alternativa de excelente calidad nutricional para las condiciones agroecológicas del Valle Inferior del Río Negro (VIRN). Por esta razón se llevaron a cabo los ensayos que conforman esta tesis con el objetivo de evaluar su comportamiento bajo diferentes prácticas de manejo agronómico. Para los mismos se seleccionaron tres genotipos a partir por su comportamiento promisorio, estos fueron: *A. cruentus* cv Mexicano, *A. hypochondriacus* cv Dorado y *A. hypochondriacus* cv Antorcha, los cuales fueron sembrados en 4 fechas (mediados de noviembre, principios y fines de diciembre, y a mediados de enero) con aplicación de riego y fertilización nitrogenada (urea) a razón de 90 kg N ha<sup>-1</sup>. *A. cruentus* cv Mexicano sembrado a principios del mes de diciembre presentó experimentalmente la mejor respuesta adaptativa a la zona con destacados rendimientos económicos (4.300 kg ha<sup>-1</sup>) y biológicos (21.300 kg ha<sup>-1</sup>). En lo que respecta a la fenología del cultivo se observó cómo la radiación, temperatura y fotoperíodo incidieron en el desarrollo de las plantas de amaranto con un acortamiento en la longitud del ciclo productivo conforme se retrasó la fecha de siembra.

*A. Cruentus* cv Mexicano, por su respuesta adaptativa y excelentes rendimientos fue utilizado para evaluar su comportamiento bajo diferentes dosis de fertilización, densidades de plantas y frecuencias de riego. La fertilización nitrogenada (0, 50, 100, 150 y 300 kg N ha<sup>-1</sup>) mostró aumentos en los rendimientos económicos, biológicos y en sus componentes conforme se incrementó la dosis de fertilizante. Fenológicamente el cultivo extendió la longitud de ciclo productivo conforme se aumentó la dosis de fertilización. La dosis que resultó en la mejor

### III

respuesta fue de 150 kg N ha<sup>-1</sup> con rendimientos económicos (4.100 kg ha<sup>-1</sup>) y biológicos (20.900 kg ha<sup>-1</sup>) óptimos.

Para las densidades evaluadas (71.500, 85.800, 110.000, 143.000, 143.000, 286.000, 572.000 pl ha<sup>-1</sup>) se observó que aumentos en la densidad de plantas a cosecha incrementó los rendimientos económicos y biológicos del cultivo, aunque con extensión del ciclo e incremento de la pérdida de granos a cosecha por coincidencia de la misma con el periodo de precipitaciones de la zona. Una densidad intermedia, 143.000 pl ha<sup>-1</sup> a 0,70 m de espaciamiento entre surcos, permitió un adecuado stand de plantas a cosecha, el desarrollo general de las mismas y altos rendimientos económicos (2.900 kg ha<sup>-1</sup>) y biológicos (20.800 kg ha<sup>-1</sup>). Los ensayos de densidades fueron regados gravitacionalmente y recibieron una fertilización nitrogenada con urea a razón de 90 kg N ha<sup>-1</sup>.

El riego se realizó en forma gravitacional bajo 3 frecuencias (7 ,14 y 21 días) y dejó en evidencia la tolerancia del amaranto a cierto grado de estrés hídrico. Situaciones próximas al punto de marchitez permanente en el suelo durante el estadio fenológico de antesis ocasionó pérdidas de rendimiento de hasta el 29%. La aplicación de frecuencias de riego mayores redujo el ciclo del cultivo y evitó el período de lluvias de la zona. A partir de los resultados obtenidos la frecuencia de riego que resultó en una mejor respuesta del cultivo fue cada 14 días dado que permitió alcanzar altos rendimientos (3.800 kg ha<sup>-1</sup>) y una mayor eficiencia de uso de agua.

Las prácticas de manejo empleadas durante el desarrollo del cultivo generaron efectos en la calidad nutricional. Fechas de siembra tardías permitieron obtener mejores valores de calidad nutricional en grano y forraje. La fertilización con dosis de hasta 150 kg N ha<sup>-1</sup> permitió mejorar el contenido de proteína bruta. Con respecto a la densidad de plantas, el aumento de la misma por sobre 143.000 pl ha<sup>-1</sup> a 0,70 m influyó negativamente en calidad dado que incrementa los

valores de fibra y reduce el contenido proteico. En relación a la práctica de riego, frecuencias de 14 días permitieron una adecuada calidad nutricional de grano y forraje.

## **BEHAVIOR OF AMARANTH CULTIVATION IN THE LOWER RÍO NEGRO VALLEY. OPTIMIZATION OF CROP CONDITIONS**

### **ABSTRACT**

The amaranth cultivation (*Amaranthus* sp) is visualized as an alternative production of excellent nutritional quality for the agroecological conditions of the Lower Río Negro Valley (VIRN). For this reason, the essays that make up this thesis were carried out in order to evaluate their behavior under different agronomic management practices. Three genotypes were selected for their promising behavior, these were: *A. cruentus* cv Mexicano, *A. hypochondriacus* cv Dorado and *A. hypochondriacus* cv Antorcha, which were planted on 4 dates (mid-november, early and late december, and mid-January) with application of irrigation and nitrogen fertilization (urea) at a rate of 90 kg N ha<sup>-1</sup>. *A. cruentus* cv Mexican planted at the beginning of december presented the best adaptive response to the area with outstanding economic (4,300 kg ha<sup>-1</sup>) and biological (21,300 kg ha<sup>-1</sup>) yields. With regard to the phenology of the crop, it was observed how the radiation, temperature and photoperiod affected the development of the amaranth plants with a shortening in the length of the productive cycle as the sowing date was delayed.

*A. Cruentus* cv Mexicano, for its adaptive response and excellent yields was used to evaluate its behavior under different fertilization doses, plant densities and irrigation frequencies. Nitrogen fertilization (0, 50, 100, 150 and 300 kg N ha<sup>-1</sup>) showed increases in economic,

biological and component yields as the fertilizer dose was increased. Phenologically the crop extended the productive cycle length as the fertilization dose was increased. The dose that resulted in the best response was 150 kg N ha<sup>-1</sup> with optimal economic (4,100 kg ha<sup>-1</sup>) and biological (20,900 kg ha<sup>-1</sup>) yields.

For the evaluated densities (71,500, 85,800, 110,000, 143,000, 143,000, 286,000, 572,000 pl ha<sup>-1</sup>) it was observed that increases in density of plants to harvest increments the economic and biological yields of the crop, although with extension of the cycle and increase from the loss of grain to harvest by coincidence of the same with the period of rainfall in the area. An intermediate density, 143,000 pl ha<sup>-1</sup> to 0.70 m of spacing between rows, allowed an adequate stand of plants to harvest, the general development of the same and high economic yields (2,900 kg ha<sup>-1</sup>) and biological (20,800 kg) ha<sup>-1</sup>). The densities tests were gravitationally irrigated and received a nitrogen fertilization with urea at a rate of 90 kg N ha<sup>-1</sup>.

The irrigation was done in gravitational form under 3 frequencies (7, 14 and 21 days) and showed the tolerance of the amaranth to a certain degree of water stress. Situations close to the permanent wilting point in the soil during the anthesis phenological stage caused yield losses of up to 29%. The application of higher irrigation frequencies reduced the crop cycle and avoided the rainy season in the area. From the results obtained, the frequency of irrigation that resulted in a better response of the crop was every 14 days since it allowed to reach high yields (3,800 kg ha<sup>-1</sup>) and a greater efficiency of water use.

The management practices used during the development of the crop generated effects on nutritional quality. Late planting dates allowed obtaining better values of nutritional quality in grain and fodder. Fertilization with doses of up to 150 kg N ha<sup>-1</sup> allowed to improve the crude protein content. With regard to the density of plants, the increase of the same by over 143,000 pl

ha<sup>-1</sup> to 0.70 m influenced negatively in quality since it increases fiber values and reduces the protein content. In relation to the practice of irrigation, frequencies of 14 days allowed an adequate nutritional quality of grain and fodder.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

A la Universidad Nacional de Río Negro, al Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur, al CONICET y la Estación Experimental del INTA Valle Inferior, por creer en mí y por proporcionar los medios y las condiciones necesarias para la realización de esta Tesis.

Al Doctor Gustavo Orioli por su dedicación, sugerencias, correcciones y sobre todo por su calidez de persona y su desinteresado aporte a mi formación.

Al Dr. Daniel Barrio por su apoyo, consejos, y compromiso con este trabajo.

A la Lic. Camina por sus invalorable aportes y correcciones estadísticas.

A Roberto Martínez, Simón Martínez, Mario Villegas y Anselmo Torres por sus consejos y aportes.

A Maite Alder, compañera y amiga, por su constancia y paciencia en esta lucha conjunta.

A mis amigos del Laboratorio de Producción Animal del Departamento de Agronomía de la UNS: Hugo, Marcela y Rodrigo, por creer en mí, por su apoyo y confianza.

A mis amigos y compañeros de trabajo por ayudarme y alentarme en todo momento.

A Carlos, Javier y Martín, por acompañarme y ser mi sostén en este desafío.

¡Gracias a todos!

## INDICE

---

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>  |    |
| 1.1. Problemática.....  | 1  |
| 1.2. Justificación de la investigación.....                                   | 3  |
| 1.3. Metodología general del trabajo de tesis.....                            | 4  |
| 1.4. Estructura de la tesis.....  | 4  |
| 1.5. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....  | 6  |
| 1.6. OBJETIVOS DE TRABAJO:  |    |
| 1.6.1. Objetivo general.....  | 6  |
| 1.6.2. Objetivos específicos.....   | 6  |
| 1.7. Origen del cultivo.....  | 7  |
| 1.8. Distribución geográfica del amaranto.....                                | 9  |
| 1.9. Actualidad del cultivo de amaranto.....                                  | 11 |
| 1.10. Actualidad del amaranto en Argentina.....                               | 14 |
| 1.11. El amaranto.....  | 17 |
| 1.11.1. Taxonomía .....   | 18 |
| 1.11.2. Morfología de la planta.....  | 18 |
| 1.11.3. Polinización del cultivo de amaranto.....                             | 25 |
| 1.11.4. Requerimientos climáticos y fisiológicos del cultivo de amaranto..... | 27 |
| 1.11.4.1. Respuesta al fotoperiodo.....                                       | 28 |
| 1.11.4.2. Requerimientos hídricos.....  | 28 |
| 1.11.4.3. Respuesta a la altitud y a la temperatura.....                      | 29 |
| 1.11.4.4. Requerimientos edáficos.....  | 30 |
| 1.12. Manejo del cultivo.....   | 31 |
| 1.12.1. Preparación de la cama de siembra.....                                | 31 |
| 1.12.2. Siembra.....  | 31 |
| 1.12.3. Elección de la fecha de siembra y variedades.....                     | 32 |
| 1.12.4. Densidad de plantas.....  | 33 |
| 1.12.5. Fenología del cultivo.....  | 33 |
| 1.12.6. Desmalezado y Raleo.....  | 33 |
| 1.12.7. Fertilización.....  | 34 |
| 1.12.8. Cosecha y trilla.....   | 35 |
| 1.13. Enfermedades y plagas.....  | 37 |
| 1.13.1. Enfermedades causadas por hongos.....                                 | 39 |
| 1.13.2. Fisiopatías.....  | 40 |
| 1.14. Planta modelo de amaranto o “ideotipo”.....                             | 41 |
| 1.15. Calidad nutricional del amaranto.....                                   | 42 |
| 1.16. Usos del amaranto.....  | 45 |
| <b>2. MATERIALES Y METODOS</b>  |    |
| 2.1. Localización.....  | 49 |
| 2.2. Sitio experimental.....  | 51 |
| 2.3. Ciclos de cultivo.....   | 53 |
| 2.4. Manejo del cultivo.....  | 56 |
| 2.5. Datos recolectados.....  | 64 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>3. FECHAS DE SIEMBRA Y VARIEDADES</b>                        |     |
| 3.1. Introducción.....  | 68  |
| 3.2. Materiales y métodos.....                                  | 71  |
| 3.2.1. Diseño experimental.....                                 | 71  |
| 3.2.2. Manejo del cultivo.....                                  | 72  |
| 3.2.3. Datos recolectados.....                                  | 73  |
| 3.2.4. Análisis estadístico.....                                | 74  |
| 3.3. Resultados   |     |
| 3.3.1. Variables morfofisiológicas.....                         | 74  |
| 3.3.2. Rendimiento en grano o rendimiento económico (Re).....   | 79  |
| 3.3.3. Biomasa aérea o rendimiento biológico (Rb).....          | 82  |
| 3.3.4. Peso seco de panoja (P <sub>Sp</sub> ).....              | 83  |
| 3.3.5. Longitud de panoja (L <sub>p</sub> ).....                | 84  |
| 3.3.6. Peso de mil granos (P <sub>1000</sub> ).....             | 85  |
| 3.3.7. Peso seco de granos por panoja (P <sub>Sp</sub> gp)..... | 85  |
| 3.3.8. Número de granos por panoja (N <sub>gp</sub> ).....      | 87  |
| 3.3.9. Densidad de plantas a cosecha (D <sub>ptc</sub> ).....   | 88  |
| 3.3.10. Índice de cosecha (IC).....                             | 89  |
| 3.4. Discusión.....   | 90  |
| 3.5. Conclusiones.....  | 102 |
| <b>4. FENOLOGIA DEL CULTIVO</b>                                 |     |
| 4.1. Introducción.....  | 104 |
| 4.2. Materiales y métodos.....                                  | 109 |
| 4.2.1. Diseño experimental.....                                 | 109 |
| 4.2.2. Manejo del cultivo.....                                  | 110 |
| 4.2.3. Datos recolectados.....                                  | 110 |
| 4.2.4. Análisis estadístico.....                                | 112 |
| 4.3. Resultados   |     |
| 4.3.1. Variables fenológicas expresadas en días.....            | 113 |
| 4.3.2. Variables fenológicas expresadas en GDD.....             | 115 |
| 4.3.3. Variables meteorológicas.....                            | 117 |
| 4.4. Discusión.....   | 119 |
| 4.5. Conclusiones.....  | 127 |
| <b>5. FERTILIZACION NITROGENADA</b>                             |     |
| 5.1. Introducción.....  | 128 |
| 5.2. Materiales y métodos.....                                  | 132 |
| 5.2.1. Diseño experimental.....                                 | 132 |
| 5.2.2. Manejo del cultivo.....                                  | 132 |
| 5.2.3. Datos recolectados.....                                  | 133 |
| 5.2.4. Análisis estadístico.....                                | 134 |
| 5.3. Resultados   |     |
| 5.3.1. Variables morfofisiológicas.....                         | 136 |
| 5.3.2. Rendimiento y sus componentes.....                       | 139 |
| 5.3.3. Incidencia de enfermedad.....                            | 145 |
| 5.3.4. Fenología del cultivo.....                               | 146 |
| 5.4. Discusión.....   | 148 |
| 5.5. Conclusiones.....  | 155 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>6. DENSIDAD DE PLANTAS</b>                     |     |
| 6.1. Introducción.....                            | 156 |
| 6.2. Materiales y métodos.....                    | 157 |
| 6.2.1. Diseño experimental.....                   | 157 |
| 6.2.2. Manejo del cultivo.....                    | 158 |
| 6.2.3. Datos recolectados.....                    | 159 |
| 6.2.4. Análisis estadístico.....                  | 160 |
| 6.3. Resultados                                   |     |
| 6.3.1. Variables morfofisiológicas.....           | 161 |
| 6.3.2. Rendimiento y sus componentes.....         | 164 |
| 6.3.3. Fenología del cultivo.....                 | 170 |
| 6.4. Discusión.....                               | 171 |
| 6.5. Conclusiones.....                            | 178 |
| <br>  |     |
| <b>7. FRECUENCIAS DE RIEGO</b>                    |     |
| 7.1. Introducción.....                            | 180 |
| 7.2. Materiales y métodos.....                    | 185 |
| 7.2.1. Diseño experimental.....                   | 185 |
| 7.2.2. Manejo del cultivo.....                    | 186 |
| 7.2.3. Datos recolectados.....                    | 190 |
| 7.2.4. Análisis estadístico.....                  | 191 |
| 7.3. Resultados.....                              | 192 |
| 7.3.1. Evolución del agua en el suelo.            |     |
| 7.3.1.1. Tratamiento I: Riego cada 7 días.....    | 194 |
| 7.3.1.2. Tratamiento II: Riego cada 14 días.....  | 194 |
| 7.3.1.3. Tratamiento III: Riego cada 21 días..... | 194 |
| 7.3.2. Variables morfofisiológicas.....           | 195 |
| 7.3.3. Rendimiento y sus componentes.....         | 196 |
| 7.3.4. Fenología del cultivo.....                 | 201 |
| 7.4. Discusión.....                               | 202 |
| 7.5. Conclusiones.....                            | 209 |
| <br>  |     |
| <b>8. CALIDAD NUTRICIONAL</b>                     |     |
| 8.1. Introducción.....                            | 211 |
| 8.2. Materiales y métodos.....                    | 217 |
| 8.2.1. Diseño experimental.....                   | 217 |
| 8.2.2. Datos recolectados.....                    | 217 |
| 8.2.3. Análisis estadístico.....                  | 219 |
| 8.3. Resultados.                                  |     |
| 8.3.1. Calidad nutricional del grano              |     |
| 8.3.1.1. Fechas de siembra.....                   | 219 |
| 8.3.1.2. Fertilización nitrogenada.....           | 221 |
| 8.3.1.3. Densidades de plantas.....               | 221 |
| 8.3.1.4. Frecuencias de riego.....                | 222 |
| 8.3.2. Calidad nutricional del forraje.....       | 223 |
| 8.3.2.1. Fechas de siembra.....                   | 224 |

|   |            |
|---|------------|
| 8.3.2.2. Fertilización nitrogenada..... | 225        |
| 8.3.2.3. Densidades de plantas.....     | 227        |
| 8.3.2.4. Frecuencias de riego.....      | 229        |
| 8.4. Discusión                          |            |
| 8.4.1. Fechas de siembra.....           | 231        |
| 8.4.2. Fertilización nitrogenada.....   | 235        |
| 8.4.3. Densidades de plantas.....       | 238        |
| 8.4.4. Frecuencias de riego.....        | 240        |
| 8.5. Conclusiones.....                  | 243        |
| <b>9. CONCLUSIONES FINALES.....</b>     | <b>245</b> |
| <b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>            | <b>247</b> |
| <b>11. ANEXO.....</b>                   | <b>281</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Hábitats nativos de las especies de <i>Amaranthus</i> utilizadas para grano.....   | 10 |
| Figura 1.2. Planta entera de amaranto.....   | 19 |
| Figura 1.3. Ramificaciones y diferentes coloraciones de tallos de amaranto.....  | 20 |
| Figura 1.4. Raíz principal y ramificaciones del amaranto.....  | 20 |
| Figura 1.5. Hojas de la planta de amaranto.....  | 21 |
| Figura 1.6. Detalle de nervaduras de la hoja de amaranto.....  | 21 |
| Figura 1.7. Flores dispuestas en glomerulo.....  | 22 |
| Figura 1.8. Formato de la inflorescencia de amaranto.....  | 23 |
| Figura 1.9. Esquema de pixidio unilocular de amaranto.....   | 23 |
| Figura 1.10. Semilla de amaranto en tamaño real.....   | 24 |
| Figura 1.11. Diagrama de secciones transversal (a) y longitudinal (b) de semilla de amaranto.....  | 25 |
| Figura 1.12. Cosecha manual del cultivo de amaranto.....   | 36 |
| Figura 1.13. Cosecha mecanizada del cultivo de amaranto.....   | 37 |
| Figura 1.14. Ataque de “oruga del yuyo colorado” <i>Loxostege bifidalis</i> .....  | 38 |
| Figura 1.15. Daños foliares ocasionados por “bicho moro” <i>Epicauta adspersa</i> .....  | 38 |
| Figura 1.16. Mancha negra del tallo en cultivo de amaranto.....  | 39 |
| Figura 2.1. Imagen satelital del Valle Inferior del Río Negro.....   | 50 |
| Figura 2.2. Riego de parcelas de ensayo mediante método gravitacional.....   | 52 |
| Figura 2.3. Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2010-2011..... | 53 |
| Figura 2.4. Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2011-2012..... | 54 |
| Figura 2.5. Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2012-2013..... | 54 |
| Figura 2.6. Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2013-2014..... | 55 |
| Figura 2.7. Temperatura de suelo promedio a 10 cm de profundidad para los ciclos productivos de experimentación.....                           | 56 |
| Figura 2.8. Siembra manual a chorrillo.....  | 57 |
| Figura 2.9. Metodología de curado de semillas.....   | 57 |
| Figura 2.10. Desmalezado manual de parcelas experimentales.....  | 58 |
| Figura 2.11. Muestreo de suelo mediante utilización de barreno.....  | 59 |
| Figura 2.12. Fertilización manual de parcelas experimentales de amaranto.....  | 60 |
| Figura 2.13. Plantas encapuchadas con características morfológicas deseadas para la obtención de semilla. ....                                 | 61 |
| Figura 2.14. Cosecha manual.....   | 62 |
| Figura 2.15. Panojas acondicionadas en polietileno para su secado.....   | 63 |
| Figura 2.16. Trillado manual.....  | 63 |
| Figura 3.1. Número de hojas visibles a inicio de panojamiento para las distintas fechas de siembra y cultivares evaluados .....                | 75 |
| Figura 3.2. Fuentes de variación principales para las variables morfofisiológicas estudiadas.....  | 77 |
| Figura 3.3. Incidencia de “mancha del tallo” según fechas de siembra y cultivares evaluados.....   | 79 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.4. Rendimiento en grano de los cultivares evaluados para las cuatro fechas de siembra en los tres años de ensayo.....  | 80  |
| Figura 3.5. Rendimiento en grano de los cultivares evaluados para tres fechas de siembra en los tres años ensayados.....  | 81  |
| Figura 3.6. Biomasa aérea por hectárea para los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años ensayados.....  | 82  |
| Figura 3.7. Comportamiento de la variable peso seco de panoja en los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años ensayados.....   | 83  |
| Figura 3.8. Comportamiento de la variable longitud de panoja en los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo.....  | 84  |
| Figura 3.9. Comportamiento de la variable P1000 de los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo.....   | 85  |
| Figura 3.10. Comportamiento de la variable Peso seco de granos panoja en los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo.....   | 86  |
| Figura 3.11. Comportamiento de la variable número de granos por panoja en los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo.....  | 87  |
| Figura 3.12. Comportamiento de la densidad de plantas a cosecha para los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años de ensayo.....   | 88  |
| Figura 3.13. Comportamiento del índice de cosecha en los cultivares evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años de ensayo.....   | 89  |
| Figura 4.1. Longitud del ciclo de cultivo en días para las diferentes etapas fenológicas evaluadas en cada una de las fechas estudiados. ....   | 115 |
| Figura 4.2. Longitud del ciclo de cultivo en grados días de crecimiento (GDD) para las diferentes etapas fenológicas en cada una de las fechas de siembra estudiadas.....   | 117 |
| Figura 4.3. Comportamiento de la temperatura máxima, mínima y de las duración del día en promedio para los años de ensayo evaluados según las fechas de siembra y cosecha utilizadas.....                         | 118 |
| Figura 4.4. Frecuencia media en días con temperaturas inferiores a Tbase para los diferentes estadios fenológicos estudiados en los ciclos productivos ensayados.....   | 119 |
| Figura 5.1. Comportamiento promedio de hojas visibles a inicio de panojamiento para los ciclos productivos estudiados según las diferentes dosis de fertilización evaluadas.....                                  | 137 |
| Figura 5.2. Esquema del comportamiento del máximo nudos, máximo de hojas, máximo de ramificaciones durante los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013 para las diferentes dosis de fertilización ensayadas..... | 138 |
| Figura 5.3. Comportamiento de la biomasa aérea de planta y sus componentes bajo las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 140 |
| Figura 5.4. Comportamiento del peso seco de granos por panoja y del Peso seco de estructura floral como porcentaje del peso seco de panoja bajo las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....              | 141 |
| Figura 5.5. Comportamiento del rendimiento económico para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.6. Comportamiento del peso de mil granos para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 143 |
| Figura 5.7. Comportamiento del número de granos por panoja para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....   | 144 |
| Figura 5.8. Comportamiento del peso seco de granos por panoja para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 144 |
| Figura 5.9. Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 145 |
| Figura 5.10. Incidencia de plantas enfermas con <i>Macrophoma sp</i> según las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 146 |
| Figura 5.11: Tiempo cronológico de cada estadio fenológico del cultivo para las diferentes dosis de fertilizante ensayadas.....  | 147 |
| Figura 6.1. Comportamiento promedio de hojas visibles a inicio de panojamiento para cada ciclo productivo estudiado según las diferentes densidades de siembra evaluadas.....          | 158 |
| Figura 6.2. Comportamiento de la biomasa aérea de planta y sus componentes bajo las diferentes densidades de siembra evaluadas .....   | 158 |
| Figura 6.3. Comportamiento del peso seco panoja y sus componentes para las diferentes densidades de siembra evaluadas .....  | 162 |
| Figura 6.4. Pérdida porcentual de plantas según las diferentes densidades de siembra evaluadas.....  | 163 |
| Figura 6.5. Curva de ajuste del rendimiento económico en función de la densidad de plantas logradas a cosecha.....   | 164 |
| Figura 6.6. Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....   | 165 |
| Figura 6.7. Incidencia de plantas enfermas con <i>Macrophoma sp.</i> según las diferentes densidades de siembra ensayadas.....   | 168 |
| Figura 6.8. Duración de los estadios fenológicos evaluados para cada fecha de siembra ensayada.....  | 170 |
| Figura 7.1. Representación porcentual de los componentes de la biomasa aérea de planta (Bapt) para las diferentes frecuencias de riego ensayadas .....                                 | 198 |
| Figura 7.2. Representación porcentual ampliada de los componentes de la biomasa aérea de planta para las distintas frecuencias de riego ensayadas .....                                | 198 |
| Figura 7.3. Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes frecuencias de riego ensayadas .....   | 200 |
| Figura 7.4. Duración en días para los estadios fenológicos del cultivo asociados a las diferentes frecuencias de riego ensayadas .....   | 202 |
| Figura A.1. Análisis de ANOVA de la variable rendimiento para 3 cultivares, 4 fechas de siembra y 3 años de ensayo.....  | 283 |
| Figura A.2. Porcentajes de fuente de variación del análisis de ANOVA con contrastes realizado para 4 fechas, 3 cultivares y 3 años.....  | 284 |
| Figura A.3. Plantas de <i>Amaranthus caudatus cv</i> Dorado ciclo productivo 2010-2011 obtenidas a partir de semilla proveniente de Río Cuarto, Córdoba con polinización abierta.....  | 286 |
| Figura A.4. Plantas de <i>Amaranthus caudatus cv</i> Dorado ciclo productivo 2011-2012 obtenidas a partir de semilla de plantas autopolinizadas en el Valle Inferior de Río Negro..... | 287 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura A.5. Plantas de <i>Amaranthus caudatus</i> cv Dorado ciclo productivo 2012-2013 obtenidas a partir de semilla de plantas autopolinizadas en el Valle Inferior de Rio Negro.....        | 287 |
| Figura A.6. Relación insumo producto para las condiciones del ensayo.....   | 289 |
| Figura A.7. Ingresos percibidos para diferentes precios unitarios del producto.....   | 289 |
| Figura A.8. Producto marginal (PMg) en función de las dosis de fertilizante utilizadas para las condiciones de ensayo.....  | 290 |
| Figura A.9. Nivel óptimo de producción según los diferentes precios unitarios de producto .....   | 290 |
| Figura A.10. Imágenes ilustrativas del comportamiento del cultivo de <i>Amaranthus cruentus</i> cv Mexicano durante los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 sin aplicación de riego..... | 291 |
| Figura A.11. Emergencia de plantulas de amaranto con aplicación de riego.....   | 291 |
| Figura A.12. Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.....                                   | 292 |
| Figura A.13. Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.....                                   | 293 |
| Figura A.14. Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.....                                   | 294 |

## INDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1.1. Ventajas y desventajas del cultivo de amaranto.....   | 48  |
| Tabla 2.1. Calidad de agua de riego del Valle Inferior del Río Negro.....  | 52  |
| Tabla 2.2. Metodología de determinación de variables asociadas a la calidad nutricional de tallo, hoja y grano.....  | 67  |
| Tabla 3.1. Textura y análisis químico de los suelos utilizados en los ensayos de fechas de siembras y variedades para los diferentes años de estudio.....  | 72  |
| Tabla 3.2. Fechas de siembra para los ciclos productivos de ensayo.....  | 73  |
| Tabla 3.3. Resultados de la comparación de cultivares para las diferentes variables morfofisiológicas evaluadas según las distintas fechas de siembra estudiadas.....                              | 76  |
| Tabla 4.1. Valores promedios en días después de la siembra (DDS) para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 según fecha de siembra y cultivar..... | 113 |
| Tabla 4.2. Valores promedios en grados días (GDD) para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 según fecha de siembra y cultivar.....                | 116 |
| Tabla 5.1. Determinaciones químicas de los suelos de los ensayos de fertilización para los diferentes años de estudio.....   | 133 |
| Tabla 5.2. Máximo número de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 137 |
| Tabla 5.3. Altura de la planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 139 |
| Tabla 5.4. Número de hojas, ramificaciones y área foliar a cosecha para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....   | 139 |
| Tabla 5.5. Respuesta del rendimiento biológico y de sus componentes frente a las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 140 |
| Tabla 5.6. Respuesta del rendimiento económico y de sus componentes frente a las diferentes dosis de fertilización ensayadas.....  | 142 |
| Tabla 5.7. Valores promedios en días para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 para las dosis de fertilización ensayadas.....                     | 146 |
| Tabla 6.1. Tratamientos utilizados en el ensayo de densidades durante los ciclos productivos estudiados.....   | 162 |
| Tabla 6.2. Determinaciones químicas de los suelos de los ensayos de densidades de siembra para los diferentes años de estudio.....   | 165 |
| Tabla 6.3. Máximo número de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....   | 166 |
| Tabla 6.4. Número de hojas, ramificaciones y área foliar a cosecha para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....  | 167 |
| Tabla 6.5. Altura de planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....  | 168 |
| Tabla 6.6. Valores promedio de rendimiento biológico y sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....  | 169 |
| Tabla 6.7. Valores promedio de rendimiento económico y sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas. ....   | 169 |

## XVII

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 6.8. Valores promedios en días para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013 para las diferentes densidades de siembra ensayadas.....   | 171 |
| Tabla 7.1. Análisis químico de los suelos utilizados en los ensayos de frecuencia de riego para los diferentes años de estudio .....   | 187 |
| Tabla 7.2. Fechas de último riego, cosecha y duración total del ciclo para los distintos tratamientos evaluados en los años de ensayo .....  | 192 |
| Tabla 7.3. Número de riegos, lámina de riego aplicada, aporte de lluvia, total de agua ingresada al perfil y evapotranspiración para los distintos tratamientos evaluados en los años de ensayo .....  | 193 |
| Tabla 7.4. Valores promedio de hojas a inicio de panojamiento, máximo de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes frecuencias de riego ensayadas.....   | 195 |
| Tabla 7.5. Valores promedio de hojas, ramificaciones, área foliar y relación entre área foliar y número de hojas a cosecha para los diferentes tratamientos de riego ensayados.....  | 196 |
| Tabla 7.6. Valores promedio de altura de planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para los diferentes tratamientos de riego ensayados.....  | 196 |
| Tabla 7.7. Valores promedio de peso seco de tallo, hojas, panoja, granos por panoja, inflorescencia; número de granos por panoja; peso de mil granos; relación entre número de granos por panoja y peso seco de inflorescencia; y biomasa aérea de planta para los diferentes tratamientos de riego ensayados..... | 197 |
| Tabla 7.8. Valores promedio de rendimiento biológico, rendimiento económico, índice de cosecha, densidad de plantas a cosecha por hectárea y porcentaje de plantas enfermas para los diferentes tratamientos de riego.....   | 199 |
| Tabla 7.9. Valores promedio de eficiencia de uso de agua para los diferentes tratamientos de riego utilizados en los ciclos ensayados.....   | 200 |
| Tabla 7.10. Valores promedio en días después de la siembra para las variables fenológicas registradas en los distintos tratamientos de riego durante los ciclos ensayados.....   | 201 |
| Tabla 8.1. Metodología para la determinación de variables asociadas a la calidad nutricional de tallo, hoja y grano.....   | 218 |
| Tabla 8.2. Calidad nutricional del grano para las diferentes fechas de siembra evaluadas.....  | 220 |
| Tabla 8.3. Calidad nutricional del grano para las diferentes dosis de fertilización evaluadas .....  | 221 |
| Tabla 8.4. Calidad nutricional del grano para las diferentes densidades de siembra evaluadas .....   | 222 |
| Tabla 8.5. Calidad nutricional del grano para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.....   | 223 |
| Tabla 8.6. Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes fechas de siembra evaluadas.....  | 224 |
| Tabla 8.7. Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes fechas de siembra evaluadas .....   | 225 |
| Tabla 8.8. Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes dosis de fertilización evaluadas .....  | 226 |
| Tabla 8.9. Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes dosis de fertilización evaluadas .....  | 227 |

## XVIII

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 8.10. Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes densidades de plantas evaluadas.....                             | 228 |
| Tabla 8.11. Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes densidades de plantas evaluadas.....                                 | 229 |
| Tabla 8.12. Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.....                              | 230 |
| Tabla 8.13. Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.....                                  | 231 |
| Tabla A.1. Determinación de PMP y CC .....   | 281 |
| Tabla A.2. Rendimientos promedios según fecha de siembra, año de cultivo y cultivar.....   | 282 |
| Tabla A.3. Análisis de ANOVA de la variable rendimiento (Re) para 3 cultivares, 4 fechas de siembra y 3 años de ensayo.....                      | 283 |
| Tabla A.4. Análisis de ANOVA con contraste de F4 vs (F3+F2+F1) para la variable rendimiento (Re) con 3 cultivares y 3 años de ensayo.....        | 284 |
| Tabla A.5. Análisis de ANOVA con contraste de Dorado vs (Mexicano + Antorcha) para la variable rendimiento (Re) 3 fechas y 3 años de ensayo..... | 285 |
| Tabla A.6. Análisis de ANOVA de la variable rendimiento (Re) para 2 cultivares, 3 fechas de siembra y 3 años de ensayo.....                      | 285 |

## INDICE DE ABREVIATURAS

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>AC</b>              | Altura a cosecha   |
| <b>AFC</b>             | Área foliar a cosecha  |
| <b>ANOVA</b>           | Análisis de varianza   |
| <b>AU</b>              | Agua útil  |
| <b>BApt</b>            | Biomasa aérea de planta  |
| <b>C.E</b>             | Conductividad eléctrica  |
| <b>Ca</b>              | Calcio   |
| <b>CC</b>              | Capacidad de campo   |
| <b>Cen</b>             | Cenizas  |
| <b>DDS</b>             | Días después de la siembra   |
| <b>DMS</b>             | Digestibilidad de la materia seca  |
| <b>Dptc</b>            | Densidad de plantas a cosecha  |
| <b>E</b>               | Días a emergencia  |
| <b>EEAVI</b>           | Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior  |
| <b>ETA<sup>2</sup></b> | Proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA |
| <b>ETc</b>             | Evapotranspiración del cultivo   |
| <b>FDA</b>             | Fibra detergente ácido   |
| <b>FDN</b>             | Fibra detergente neutro  |
| <b>GDD</b>             | Grados días de crecimiento   |
| <b>GL</b>              | Días a grano lechoso   |
| <b>GP</b>              | Días a grano pastoso   |
| <b>HC</b>              | Número hojas a cosecha   |
| <b>HIP</b>             | Hojas visibles a inicio de panojamiento  |
| <b>IA</b>              | Días a inicio de antesis   |
| <b>IC</b>              | Índice de cosecha  |
| <b>IDEVI</b>           | Instituto de Desarrollo del Valle Inferior de Río Negro  |
| <b>INASE</b>           | Instituto Nacional de Semillas   |
| <b>INTA</b>            | Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria  |
| <b>IP</b>              | Días a inicio de panojamiento  |
| <b>LDA</b>             | Lignina detergente ácido   |
| <b>Lp</b>              | Longitud de panoja   |
| <b>M</b>               | Días a madurez fisiológica   |
| <b>MAF</b>             | Máxima área foliar   |
| <b>Mg</b>              | Magnesio   |
| <b>MH</b>              | Máximo de hojas  |
| <b>MN</b>              | Máximo de nudos  |
| <b>MO</b>              | Materia orgánica   |
| <b>MR</b>              | Máximo de ramificaciones   |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>MS</b>                 | Materia seca   |
| <b>N</b>                  | Nitrógeno  |
| <b>Ngp</b>                | Número de granos por panoja  |
| <b>N-NO<sup>3</sup></b>   | Nitrógeno de nitratos  |
| <b>Nt</b>                 | Nitrógeno total  |
| <b>P</b>                  | Fósforo  |
| <b>P Olsen</b>            | Fósforo extractable por metodología Olsen                              |
| <b>P1000</b>              | Peso de mil granos   |
| <b>PH</b>                 | Peso húmedo  |
| <b>pH</b>                 | Coefficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución |
| <b>pl ha<sup>-1</sup></b> | Plantas por hectárea   |
| <b>PMP</b>                | Punto de marchitez permanente  |
| <b>PS</b>                 | Peso seco  |
| <b>PSgp</b>               | Peso seco de granos por panoja   |
| <b>PSh</b>                | Peso seco de las hojas   |
| <b>PSi:</b>               | Peso seco de la estructura   |
| <b>PSp</b>                | Peso seco de la panoja   |
| <b>PSt</b>                | Peso seco del tallo  |
| <b>Q</b>                  | Caudal   |
| <b>RAS</b>                | Relación adsorción sodio   |
| <b>Rb</b>                 | Biomasa aérea por hectárea o rendimiento                               |
| <b>RC</b>                 | Número de ramificaciones a cosecha                                     |
| <b>Re</b>                 | Rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico              |
| <b>S</b>                  | Azufre   |
| <b>T<sub>b</sub></b>      | Temperaturas base o mínima   |
| <b>T<sub>m</sub></b>      | Temperatura máxima o letal   |
| <b>T<sub>o</sub></b>      | Temperatura óptima   |
| <b>TT</b>                 | Tiempo térmico   |
| <b>UC</b>                 | Unidades de calor  |
| <b>UNRC</b>               | Universidad Nacional de Río Cuarto                                     |
| <b>VIRN</b>               | Valle Inferior del Río Negro   |
| <b>ΦT</b>                 | Diámetro del tallo   |
| <b>% Pe</b>               | Porcentaje de plantas enfermas   |
| <b>100% A</b>             | Días al 100% de antesis  |
| <b>100%P</b>              | Días al 100% de panojamiento   |

# **1. INTRODUCCIÓN**

---

## **1.1. Problemática**

Entre los desafíos a futuro de la humanidad se encuentra en la búsqueda de un equilibrio sustentable en el planeta frente al importante incremento de la población mundial, hecho que pone en tensión la producción de alimentos. La superpoblación mundial ha generado problemáticas como la desnutrición, desigualdades sociales y deterioro del medio ambiente, que deben ser enfrentadas de manera rápida y certera.

La agricultura es la principal actividad que puede aportar de manera directa soluciones a esta problemática, dado que es la fuente de la mayoría de los alimentos, fibras y demás materias primas que hacen a la vida cotidiana de la población mundial. La agricultura debe lograr la máxima eficiencia productiva de cada uno de sus sitios con sustentabilidad de los mismos e incrementar la superficie productiva mediante la incorporación de aquellos ambientes que han sido relegados por sus condiciones ambientales extremas o bien por el deterioro causado por efecto del hombre. El uso eficiente del agua es otro desafío para la humanidad, tanto en su uso cotidiano como en la agricultura. Este recurso ha comenzado a escasear en los últimos años y es fundamental para la productividad de algunos sitios.

Los procesos de transición en la alimentación de muchos países han evolucionado hacia el consumo de productos ricos en energía, grasas (especialmente grasas saturadas), azúcares, sal, y pobres en micronutrientes, fibra dietética y fotoquímicos bioactivos. Los cambios en el estilo de vida asociados con la urbanización rápida favorecen una alimentación aún más inadecuada, factores que condicionan la aparición de enfermedades crónicas no transmisibles relacionadas con la dieta tales como obesidad, hipertensión arterial o cardiovasculares (FAO, 2013). En la actualidad las producciones alternativas han surgido como una nueva línea de trabajo que ofrecen una amplia gama de cultivos capaces de adaptarse a diferentes ambientes, con buenos rendimientos y con excelente calidad nutricional.

Entre los cultivos alternativos podemos mencionar el amaranto, de destacado potencial nutricional, habilidad competitiva y de adaptación con mínimos requerimientos de manejo. Técnicamente el amaranto es considerado un pseudocereal, ya que tiene características similares a las de los granos de cereales verdaderos de las monocotiledóneas. Se diferencian en que el amaranto tiene almidón almacenado en el perispermo y el embrión ocupa gran parte del grano. Esta característica hace a la especie una importante fuente de lípidos y proteínas. Sin embargo, por ser una dicotiledónea, no es considerado como un cereal verdadero.

El amaranto ha sido utilizado no sólo en la alimentación animal sino también para el consumo humano ya sea en forma de grano (harina, barras de cereal, polvos pre-gel etc) o bien mediante la utilización de sus hojas, las cuales contienen altos niveles de calcio, hierro, fósforo y magnesio, así como ácido ascórbico, vitamina A y fibra. (Alfaro *et al.*, 1987).

Alrededor del 17% del grano está constituido por proteínas de reserva, a pesar de ello su importancia no radica sólo en la cantidad sino en la calidad de la proteína, ya que presenta un excelente balance de aminoácidos (Segura Nieto *et al.*, 1992; Barba de la Rosa *et al.*, 2007). Por su composición, la proteína del amaranto es similar a la de la leche vacuna y se aproxima a la proteína ideal propuesta por la FAO para la alimentación humana. Tiene un contenido importante de lisina, aminoácido comúnmente limitante en otros cereales. De acuerdo con la clasificación de Osborne, las proteínas de reserva del amaranto están constituidas mayoritariamente por albúminas, globulinas y glutelinas (Segura Nieto *et al.*, 1994).

El amaranto como producción alternativa de excelente calidad nutricional, a su vez se caracteriza por presentar una amplia variabilidad genética que le confiere gran adaptación a numerosas condiciones de clima y suelo con atractivos rendimientos. Es una especie C<sub>4</sub>, lo que le permite una elevada eficiencia en la asimilación de luz y de agua, lograr altas tasas de crecimiento y alcanzar un elevado potencial de rendimiento. Sus requerimientos tecnológicos son bajos y presenta reducida incidencia de plagas y enfermedades (Peiretti, 2010).

En el Valle Inferior del río Negro la temperatura media mensual ronda los 14°C y la amplitud térmica del lugar hacen a la zona adecuada para el desarrollo de una amplia variedad de cultivos. La precipitación media es de 391,2 mm con una distribución casi homogénea a lo largo del año. La estación primavero-estival es la de mayor importancia desde el punto de vista agrícola, se caracteriza por presentar un ambiente seco y una alta demanda hídrica debido a que las precipitaciones en este período son de irregular distribución y deficitarias para los cultivos (Berasategui, 2002). Sin embargo, la disponibilidad de un recurso hídrico de calidad y de un excelente sistema de riego instalado en la zona, brindan la posibilidad de realizar numerosos cultivos en este período.

Entre las actividades productivas más destacadas de la zona podemos mencionar en primer lugar el cultivo de forrajeras, seguido por la producción frutícola, de cereales, de hortalizas, y en menor medida producciones en viveros, forestación y cultivo de aromáticas. La actividad ganadera se centra en el engorde de vacunos y ovinos en pasturas irrigadas. Esta gran variabilidad de producciones puede llevarse a cabo debido a las condiciones ambientales, a la disponibilidad del recurso hídrico y a la gran variabilidad de series de suelo con diferentes clases texturales presentes en la zona.

## **1.2. Justificación de la investigación**

Las características fisiológicas y nutricionales que destacan al amaranto lo transforman en un cultivo estival atractivo de incorporar a los sistemas productivos del Valle Inferior de Río Negro (VIRN). Por ello se requiere obtener información de este cultivo para lograr la mejor eficiencia productiva de los recursos de la zona. Así, parámetros tales como: época de siembra, variedades y/o genotipos, condiciones de germinación, densidad de implantación, requerimientos hídricos y nutricionales, son algunos de los datos importantes de obtener para identificar el sistema de cultivo más adecuado para la especie adaptada a la región. Este trabajo

pretende establecer los parámetros mencionados anteriormente que permitan reconocer los requerimientos mínimos necesarios para lograr valores óptimos de rendimiento con buenas características de calidad en la zona del Valle Inferior del río Negro.

### **1.3. Metodología general del trabajo de tesis**

La estrategia metodológica general de los ensayos presentados en esta tesis se fundamentó en estudios centrados en el comportamiento fenológico del cultivo de amaranto mediante un trabajo básicamente descriptivo-analítico en base a técnicas de experimentación y observación a campo, con el objeto de comparar situaciones contrastantes que aporten elementos para dilucidar los requerimientos mínimos del cultivo en esta región.

### **1.4. Estructura de la tesis**

El presente trabajo de tesis está compuesto por 8 capítulos los cuales describen cada uno de los ensayos realizados en la presente investigación. En el primer capítulo, se presenta una revisión bibliográfica y actualización sobre la temática, la cual describe el marco conceptual a utilizar como referencia del presente estudio. En el segundo capítulo se realiza una descripción detallada de los materiales, métodos y prácticas de manejo del cultivo que se aplicaron para los diferentes ensayos que abarca esta tesis.

Los capítulos subsiguientes dan cuenta del trabajo de campo que ha sido realizado a fin cumplir con los objetivos de esta investigación. En el tercer capítulo, “Fechas de siembras y genotipos” se presentan los resultados del estudio realizado sobre el comportamiento de 3 genotipos de *Amaranthus*: *A. cruentus* cv Mexicano, *A. hypocondriacus* cv Dorado, *A. hypocondriacus* cv Antorcha para 4 fechas de siembra, el cual evidenció el período óptimo de siembra y el cultivar más adaptado a la zona de estudio. En el cuarto capítulo, “Fenología del cultivo” se realiza una descripción detallada del comportamiento fenológico del amaranto para

las condiciones edafoclimáticas del Valle Inferior del Río Negro en función de las fechas de siembra evaluadas en el capítulo anterior. Así mismo, en los restantes capítulos se hace referencia al efecto de las prácticas agronómicas estudiadas en la fenología del cultivo. El capítulo 5, “Fertilización nitrogenada” presenta los resultados del estudio realizado sobre *A. cruentus* cv Mexicano con 5 dosis de fertilización nitrogenada, mediante el cual se determinó la dosis de fertilizante que permite alcanzar el óptimo productivo y económico para las condiciones edafoclimáticas del área de estudio. A su vez, se muestra el efecto que ocasiona la fertilización en la fenología del cultivo. El sexto capítulo, “Densidad de siembra” describe la respuesta de *A. cruentus* cv Mexicano cultivado en 7 diferentes densidades de siembra y espaciamientos entre plantas con la finalidad de establecer la densidad que permita alcanzar el óptimo productivo y económico para las condiciones edafoclimáticas del área de estudio. Así mismo, se describe el efecto de la densidad de siembra en la fenología del cultivo. En el capítulo 7, “Frecuencias de riego”, se detalla la investigación realizada para establecer la aplicación mínima de agua que permite alcanzar el óptimo productivo y económico para las condiciones edafoclimáticas de la zona del Valle Inferior del Río Negro, a través de un ensayo con diferentes frecuencias de riego en el cultivo de *A. cruentus* cv Mexicano. A su vez, se describe el efecto de las frecuencias de riego en la fenología del cultivo.

De modo complementario en el capítulo 8, “Calidad nutricional” se presenta los resultados de las determinaciones de calidad nutricional obtenidos a partir de los muestreos realizados en los ensayos previamente descritos, a fin de evaluar el efecto de las condiciones de cultivo sobre la misma.

Para finalizar se propone una conclusión final que resume los aspectos más importantes de la investigación. La información generada tiene relevancia en aspectos claves del sistema de cultivo más adecuado para la especie adaptada a la región y los requerimientos mínimos

necesarios para lograr valores óptimos de rendimiento con buenas características de calidad en la zona del Valle Inferior del Río Negro.

## **1.5. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

La introducción del cultivo de amaranto al Valle Inferior de Río Negro (VIRN) como una producción alternativa viable, resulta de sus atributos de adaptabilidad y de variedad de ciclos de cultivo que le permiten desarrollarse adecuadamente con buenos rendimientos en grano, forraje, y óptima calidad nutricional.

## **1.6. OBJETIVOS DE TRABAJO:**

### **1.6.1. Objetivo general**

Estudiar el comportamiento del cultivo de amaranto en el Valle Inferior del Río Negro para conocer los requerimientos mínimos necesarios para lograr valores óptimos de rendimiento con buenas características de calidad.

### **1.6.2. Objetivos específicos**

1. Seleccionar entre los materiales evaluados el genotipo del género *Amaranthus* que muestre las mejores características morfológicas, productivas y de calidad para la zona del Valle Inferior del Río Negro.
2. Evaluar diferentes fechas de siembra a fin de obtener la fecha o período óptimo cuyas condiciones de temperatura y fotoperíodo sean adecuadas para el desarrollo del cultivo.
3. Conocer el comportamiento fenológico de los genotipos ensayados para la zona del Valle Inferior del Río Negro.
4. Determinar en el cultivar de mejor adaptación a la zona la densidad de siembra más favorable para el Valle Inferior del Río Negro.

5. Obtener la dosis de fertilización nitrogenada considerada óptima para el genotipo de amaranto con mejor adaptación a la zona en el Valle Inferior del Río Negro.
6. Evaluar la respuesta del genotipo con mejor adaptación a la zona en el Valle Inferior del Río Negro a diferentes frecuencias de riego.
7. Estudiar la calidad nutricional del amaranto obtenido en la región del Valle Inferior del Río Negro y su variación en respuesta a diferentes condiciones de manejo del cultivo.

### **1.7. Origen del cultivo**

Diferentes trabajos de investigación histórica demuestran importantes discrepancias sobre el origen del cultivo de amaranto. En una revisión bibliográfica sobre el tema se presentaron varios de estudios arqueológicos con hallazgos que hacen referencia al cultivo en la antigüedad en diferentes regiones del planeta (Mapes Sánchez y Espitia, 2010). El amaranto era utilizado para la producción de grano y para el consumo de planta entera como verdura de hoja en diferentes partes del mundo (Transue *et al.*, 1994, Mujica *et al.*, 1997). Singh (1961), considera al género *Amaranthus* utilizado para la producción de grano originario del sur de Asia sin embargo, no existen evidencias suficientes que respalden esta afirmación. Por su parte, Grubben y Van Sloten (1981), hacen referencia a América como sitio de origen para la producción de grano de este cultivo, mientras que las especies utilizadas como verdura serían originarias de Asia.

De igual modo, Mac Neish (1964), menciona hallazgos en sus trabajos de excavaciones que indicarían que los pueblos originarios de la región de México cultivaban amaranto 5200 a 3400 años a.C., en la misma época de domesticación del cultivo el maíz.

En el mismo sentido, Sauer (1967), menciona el uso del amaranto desde hace más de 4000 años. *Las evidencias arqueológicas encontradas confirman el origen americano de las especies cultivadas para grano, ya que, las hojas y semillas del género Amaranthus fueron utilizadas*

*por los habitantes de América Prehistórica, mucho antes del proceso de domesticación de estas plantas.* Es así que internacionalmente se asume que el amaranto fue cultivado y utilizado junto al maíz, los frijoles y el chian (salvia Hispánica) por los aztecas en el valle de México, por los mayas en Guatemala, y por los Incas en Perú, Bolivia y Ecuador junto a la papa, el maíz y la quinua (NRC, 1984).

El amaranto fue reconocido como una de las plantas que han desempeñado un papel destacado dentro de la civilización azteca y recibió el nombre de *Huauhtli* (Hunziker, 1952). En el lenguaje azteca “*huauh*” estaba relacionado con la raíz “*huaqui*” cuyo significado era secar y de allí derivó el nombre “*huactli*” para toda cosa secada en el exterior (Costea y Tardif, 2003). Sahagún en sus dibujos demuestra que el nombre *huauhtli* se utilizaba para más de una planta. En algunos de ellos aparecen hojas enteras que al parecer son amarantos y otros con hojas dentadas que parecen ser quenopodios (Sahagún, 1979).

El amaranto fue el protagonista de las diferentes ceremonias realizadas por los aztecas con el fin de adorar a distintas deidades. En estos rituales se pedían lluvias, que eran necesarias para el crecimiento de los cultivos, se realizaban sacrificios y ofrendas, en las que siempre estaba presente el amaranto. Los historiadores han hecho referencia a los aztecas como el pueblo del maíz, sin embargo, el amaranto se destacaba en los rituales religiosos dado que ocupaba el lugar del cuerpo de los dioses (Sauer, 1967; Vietmeyer, 1982, NRC, 1984). Las mujeres elaboraban una pasta de amaranto amasado con miel, a la que llamaban *tzoalli*, y con ella realizaban imágenes de sus principales dioses. Al culminar los rituales religiosos estas imágenes eran comidas por el pueblo en una comunión religiosa llamada *teocualo* (Garciadiego *et al.*, 1998). El ritual era comunal y se realizaban sacrificios humanos como colaboración del hombre con los dioses, donde la muerte permitía liberar energía para conservar la armonía del cosmos.

Todos los que habían comulgado estaban obligados a dar semilla para la ceremonia del año siguiente. A su vez, grandes cantidades de estas semillas eran entregadas anualmente a Moctezuma por cada uno de los pueblos vasallos del imperio, y de este modo el *huauhtli* era utilizado como tributo (Hunziker, 1952; Alejandro Iturbide y Gómez Lorence, 1986).

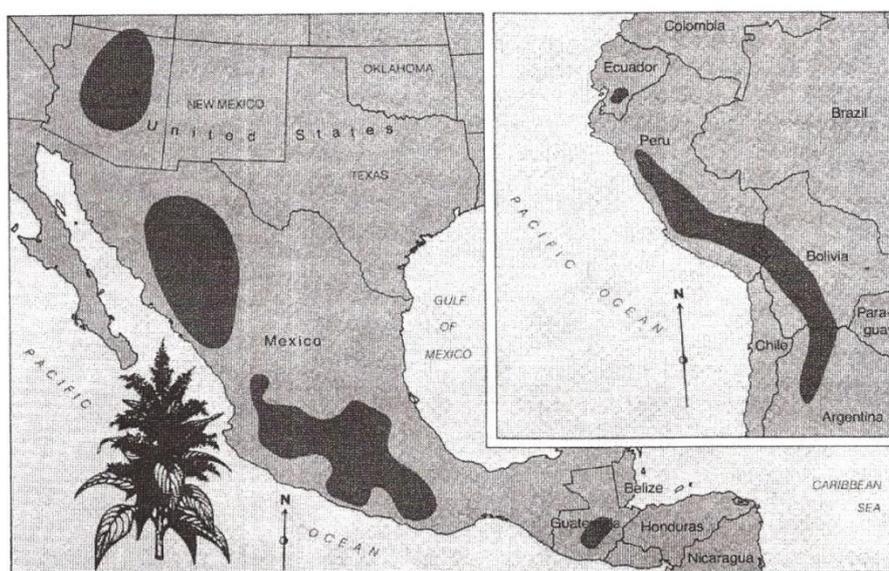
Numerosos autores mencionan la tendencia que manifestó este cultivo a desaparecer, debido a la falta de aceptación por parte de los europeos de las ceremonias realizadas por los aztecas, dado que estas festividades eran consideradas el equivalente pagano del sacramento de la comunión cristiana. Por tal motivo, los conquistadores prohibieron la siembra del amaranto, los sembradíos fueron quemados o aplastados, y se impusieron fuertes castigos tales como cortar las manos o la muerte a las personas que la cultivaran o que poseyeran esta semilla. Esta prohibición sumada a la sustitución de los cultivos autóctonos por parte de los europeos provocó una disminución drástica del amaranto que lo llevó prácticamente a su erradicación. Sólo algunas regiones lograron conservar la semilla efectuando siembras a pequeña escala. (Sauer, 1977; Kauffman y Weber, 1990; Barros y Buenrostro, 1997; Garciadiego *et al.*, 1998 y Becerra, 2000).

### **1.8. Distribución geográfica del Amaranto**

La familia Amaranthaceae comprende 60 géneros que abarcan unas 800 especies de las cuales la mayoría son nativas de América y sólo 15 provienen de Europa, Asia, África y Australia (Sauer, 1967; Feine *et al.*, 1979; Robertson, 1981). Del total de especies, sólo 3 se utilizan para la producción de grano: *A. cruentus* L., *A. hypochondriacus* L. y *A. caudatus* L. Posiblemente las especies mencionadas anteriormente desciendan de las especies silvestres *A. hybridus*, *A. powelli* y *A. quitensis* respectivamente. Por otra parte, se sostiene que *A. quitensis* es sinónimo de *A. hybridus* y que solamente ésta última podría ser la antecesora de las tres

especies cultivadas en la actualidad (Sauer, 1950; Sauer, 1967; Grubben, 1975; Grubben y Van Sloten, 1981; Coimbra y Saleman, 1994; Chan y Sun, 1997; Mujica *et al.*, 1997).

Investigaciones realizadas con la técnica de RAPD (Random amplified polymorphic DNA) sugieren como genéticamente más cercanas entre sí a las especies *A. hypochondriacus* y *A. caudatus*, a pesar de haberse originado en áreas diferentes respecto de *A. cruentus* (Transue, *et al.*, 1994). Estas especies fueron cruzándose entre sí y con sus antecesores dando lugar a nuevos híbridos de difícil identificación (Sauer, 1950).



**Figura 1.1.** Hábitats nativos de las especies de *Amaranthus* utilizadas para grano.  
Fuente: NRC, 1984. Amaranth Modern Prospects for an Ancient crop.

En tiempos precolombinos (Figura 1.1) *A. cruentus* se cultivaba y estaba ampliamente distribuida desde el Norte de México extendiéndose al interior de Guatemala hasta América Central. *A. hypochondriacus* compartía su distribución con *A. cruentus*, aunque se extendía más hacia el sudoeste de Estados Unidos. *A. caudatus* es originaria de la zona Andina Sudamericana principalmente a través de una estrecha banda por del Sur de Ecuador y a través de Perú, Bolivia y en el Norte de Argentina y desde allí se distribuyó a otras zonas templadas y subtropicales (Hunziker, 1952; Grubben, 1975; Grubben y Van Sloten, 1981; NRC, 1984).

En la actualidad el amaranto tiene una distribución cosmopolita debido a que prospera en diferentes tipos de climas, suelos y geografías. Este cultivo suele localizarse en diversas áreas tropicales y en muchas áreas templadas entre las que se destacan: Perú, Bolivia, México, sudoeste de los Estados Unidos, Guatemala, Argentina, Chile, India, Pakistán, y China. En todos estos países se cultiva con el principal objetivo de la producción de grano, y en algunos casos se aprovecha la planta entera como verdura de hoja. En Malasia e Indonesia el amaranto básicamente se utiliza como verdura (Mujica, *et al.*, 1997).

### **1.9. Actualidad del cultivo de amaranto**

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura a partir de una Prueba Regional Americana de Cultivares de Amaranto durante el ciclo productivo 1992-1993 obtuvo perspectivas optimistas sobre la producción de este cultivo, no sólo debido a su gran potencial productivo, sino también por su amplia adaptación a distintas zonas agroecológicas (Sánchez *et al.*, 1993). Se apreció una respuesta positiva del cultivo a diferentes variaciones de altitud, latitud, tipos de suelo y de disponibilidad hídrica. La difusión del cultivo de amaranto en los últimos años ha sido exponencial en diferentes países del mundo siendo los principales productores de grano China, India, Kenya, México, Nepal, Perú, EEUU y Rusia (Bale y Kauffman, 1992).

En China el cultivo se inició hace más de 100 años, aunque fue a partir de la década de 1980 que el gobierno impulsó su producción en suelos salinos y con problemas de irrigación, transformándolo en una fuente invaluable de alimento. Actualmente China cultiva la mayor superficie de amaranto con más de 150 mil hectáreas y posee uno de los bancos de germoplasma más importantes del mundo (Becerra, 2000). Los chinos utilizan el amaranto como forraje y como grano consumiéndolo como harina para pastas o dulces y el colorante para la salsa de soja (Yue y Sun, 1993).

La India es otro de los principales productores del mundo y cuenta con el segundo banco en importancia de germoplasma del cultivo. El amaranto aparece tanto en grano como en hojas en numerosos platos de la cocina tradicional hindú (Singhal, 1984).

En Estados Unidos la producción de amaranto se incrementó a mediados de la década del '70. Las semillas se consumen combinadas con granos de trigo y maíz en productos para desayuno, panes, harina de panqueques y pasta (NRC, 1989). En Iowa se encuentra una de las colecciones de germoplasma de amaranto más importante de América.

En África el amaranto es consumido principalmente como verdura mientras que en regiones de Asia, en países como Rusia, el amaranto silvestre es usado como forraje (Komen, 1992).

Europa ha mostrado interés en cultivos nuevos como el amaranto dado que presenta la posibilidad de ser sembrado en suelos marginales, con poca demanda tecnológica y que puede utilizarse en rotaciones con otros cultivos. En Dinamarca, este cultivo se empezó a estudiar a mediados de los '80, pero aún no ha sido cultivado comercialmente (Itenov y Jacobsen, 1996)

En los países económicamente más desarrollados de occidente los granos de amaranto se consumen en forma de harina, copos, harina integral de amaranto tostado, amaranto reventado al estilo rosetas, polvo pregel de amaranto, aceite de amaranto, barras de cereal, pan de amaranto, tortillas de amaranto y maíz. La harina comúnmente se utiliza para enriquecer pastas, panes, galletas y alimentos para bebés. Respecto al comercio mundial, no existen datos oficiales de exportaciones debido a que este grano carece de posición arancelaria.

En Sudamérica se destacan algunos países en la producción de este cultivo, todos ubicados en una zona andina sobre la costa del océano Pacífico, que incluye el Sur de Ecuador, Perú, Bolivia, el Norte de Argentina y Chile. Una prueba regional americana de cultivares de amaranto realizada por la FAO mostró los siguientes resultados:

En Perú las siembras comerciales no alcanzan las 2.000 ha y sus rendimientos varían entre 800-3.500 Kg ha<sup>-1</sup> dependiendo de la localidad. Se cultiva principalmente en valles interandinos de la sierra y en pequeñas extensiones asociado a maíz o formando bordes en otros cultivos. En la costa del Perú el amaranto ha tomado más relevancia, allí se cultiva bajo riego con sistemas de aspersión y altos niveles de fertilización. Esta tecnificación del cultivo es impulsada por la agroindustria.

En el Ecuador es un cultivo prácticamente desconocido aunque con grandes posibilidades productivas, fundamentalmente en los valles de las sierras donde la luminosidad es alta, las lluvias escasas y la altitud no mayor a los 2.800 msnm. Los rendimientos comerciales varían entre los 600-3.800 Kg ha<sup>-1</sup>. Es importante destacar que este país cuenta con variedades mejoradas de alta producción que con adecuado manejo tecnológico alcanzarían mayores rendimientos.

En Bolivia el amaranto se cultiva en los valles interandinos profundos, en el área andina prácticamente ha desaparecido. Los rendimientos obtenidos varían entre 700-2.500 Kg ha<sup>-1</sup>, aunque las perspectivas productivas para este país son muy buenas.

En Chile el cultivo era prácticamente desconocido hasta que la búsqueda de nuevas alternativas productivas fomentó su estudio. Ensayos realizados en el centro-norte del país con la especie *A. cruentus* han alcanzado rendimientos de 5.700 Kg ha<sup>-1</sup> y hacia el centro-sur se obtuvieron rendimientos de 4.000 Kg ha<sup>-1</sup>.

En la zona norte de América, en México, luego de haber prácticamente desaparecido durante la conquista española, el cultivo tomó nuevo impulso en la década de los '80. Sin embargo, a partir de los '90 su producción disminuyó a valores menores a 1.000 Kg ha<sup>-1</sup> con superficies inferiores a las 900 hectáreas. Esta evolución se revirtió nuevamente a partir del año 2003, donde la superficie cosechada fue de 1.435 ha con un rendimiento promedio de 1.600 Kg ha<sup>-1</sup>. En este país los granos se consumen molidos, reventados, tostados, germinados y extrusados,

esta última forma es con la que se logra un mayor valor nutritivo, y se utilizó en cereales, alegrías, granola, galletas, pan y pasteles (Sánchez *et al.*, 1993).

### **1.10. Actualidad del amaranto en Argentina**

El amaranto en Argentina se encuentra prácticamente desaparecido, suele encontrarse en pequeñas parcelas cercanas a las viviendas de productores, o bien en plantas aisladas cercanas al cultivo de maíz. Comúnmente el amaranto solía cultivarse en las regiones de Purmamarca y Humahuaca (Jujuy), en Pampa Grande (Salta) y en los valles de Tucumán y Catamarca.

Este cultivo carece de un sistema de comercialización desarrollado que se refleja en la falta de consumo masivo y la ausencia de un mercado referencial. En general se vende en negocios de dietéticas en forma de harina, grano o cereal inflado. Si bien no existe aún un mercado interno consolidado, ni transacciones internacionales, se considera que con mayores volúmenes productivos podría abastecerse a otros países.

Actualmente se vislumbran buenas perspectivas para este cultivo dado que ensayos efectuados con diferentes materiales genéticos mostraron rendimientos entre 150 y 1.500 Kg ha<sup>-1</sup> (Sánchez *et al.*, 1993). El área potencial de cultivo comprende las provincias de Jujuy, Santiago del Estero, Córdoba, este de La Pampa y oeste de Buenos Aires.

Entre los especialistas del tema, el autor Covas (1994) hace referencia al aumento de trabajos experimentales y analíticos sobre amaranto llevados a cabo en Argentina. Los primeros experimentos se efectuaron en la Estación Experimental INTA Anguil, en la Facultad de Agronomía de la Universidad de la Pampa y en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Tiempo después, la Facultad de Agronomía y veterinaria de la Universidad de Río Cuarto (Provincia de Córdoba) comenzó a trabajar intensamente con este cultivo. Entre los trabajos realizados se debe destacar el acopio de germoplasma y las labores

de fitomejoramiento que permitieron generar numerosos cultivares adaptados a las condiciones ambientales de la llanura pampeana semiárida y subhúmeda. Este autor en la campaña de 1991 menciona que el cultivo de amaranto no alcanzaba las 100 ha, posiblemente debido a la limitada labor de extensión sobre las bondades y características del amaranto. A ello se sumaba la falta de normas para la comercialización de granos y forraje, y la falta de información sobre algunos aspectos tecnológicos como el control de malezas, problemas al momento de la cosecha así como la falta de incorporación del amaranto al Código Alimentario Argentino.

Con el transcurso de los años se fueron incorporando nuevos núcleos de trabajo como universidades y estaciones experimentales. En el año 1987 el Programa Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología para la Producción (PRONITTEC) crea un subprograma de cultivos estratégicos: Quínoa-Amaranto y a través de este se otorgaron subsidios oficiales para el desarrollo de proyectos de estos cultivos. Para el año 1987 se realizan las primeras jornadas sobre amaranto en Santa Rosa, La Pampa. En el año 1990 el PRONITTEC lleva a cabo un simposio sobre Quínoa y Amaranto en la ciudad de Buenos Aires, y en 1992 un segundo simposio en la ciudad de Jujuy. En 1994 el Ministerio de Salud y Acción Social aprueba la inclusión del amaranto granífero en el Código Alimentario Argentino por medio del Artículo 660 de la resolución 80 del 13 de enero de 1994.

En las campañas 1998-1999 y 1999-2000 el Proyecto Amaranto de la Universidad Nacional de La Pampa e INTA Anguil coordinaron un ensayo en el que se cosechó amaranto fresco para materia prima en la elaboración de pastas y pan de mesa, elaborados en pequeñas fábricas, y que resultaron de gran calidad y aceptación. En este mismo ensayo se utilizó amaranto deshidratado y molido como colorante natural en la fabricación de fideos frescos. En el marco de este proyecto, y con la participación de la Universidad Nacional Tecnológica de Rosario, se evaluaron las características industriales de la harina de amaranto para conocer su comportamiento panaderil en diferentes combinaciones con harina de trigo. El rendimiento de

molienda alcanza al 65% y al no contener gluten los panes presentaron escaso volumen, sin embargo, en mezclas que contenían hasta un 10% de harina de amaranto las características panaderiles fueron aceptables. Con el sistema de molienda desarrollado se obtuvieron harinas hiperproteicas de amaranto, en un primer paso se obtuvo harina integral que luego fue concentrada para lograr una fracción con más de 40-45% de proteínas y rica en almidón. A su vez se realizó con éxito la elaboración de golosinas y barras de granola en base a este cultivo.

Más recientemente, Reinaudi y su equipo de trabajo, efectuaron ensayos para evaluar la adaptabilidad productiva de 18 genotipos de amaranto en la pampa argentina y obtuvieron rendimientos que varían según el cultivar desde los 350 hasta 2.000 Kg ha<sup>-1</sup> (Reinaudi *et al.*, 2011). Con el mismo objetivo de incorporar información científico-tecnológica de este cultivo se han sumado la Universidad Nacional de La Plata, La Universidad Nacional de Río Negro (UNRN) e institutos de investigación como CONICET y ANPCYT. Específicamente la UNRN fue la responsable de organizar las primeras y segundas jornadas técnicas sobre cultivos andinos en los años 2009 y 2013.

Se aprecia la amplia adaptación y el enorme potencial productivo del amaranto en lo que respecta a la producción de grano, y a su vez podría considerarse su utilización como hortaliza o como productora de materia verde para la alimentación del ganado. La extensión rural sería una herramienta clave para difundir las características, requerimientos del cultivo y los beneficios que el mismo aporta.

Claramente los rendimientos están sujetos a las características locales donde se realiza el cultivo, a la tecnología aplicada y al genotipo utilizado. Para maximizar rendimientos es importante conocer la respuesta del mismo a la densidad de plantas, a la fertilización, al riego, y al control de plagas, ya que ciertos rasgos morfológicos responden a estos parámetros, con modificaciones en su comportamiento según el ambiente. La clave del éxito en Argentina

parece enfocarse en las extensas superficies situadas principalmente en la zona semiárida del país, al norte de la Patagonia, que resultarían aptas para este cultivo sin necesidad de desplazar otras actividades agropecuarias. Por lo antes mencionado, para lograr la implantación de parcelas de amaranto, se requiere de la generación de una importante cantidad de información sobre el desarrollo de este cultivo, que permita una óptima explotación de los recursos de la región patagónica. Así, parámetros tales como: genotipo, condiciones de germinación, densidad, geometría, época de siembra, requerimientos nutricionales y de agua, son algunos de los datos importantes a tener en cuenta a la hora de planificar un sistema de cultivo adecuado. Con este objetivo se plantearon los ensayos que conforman esta tesis en el Valle Inferior de Río Negro (VIRN) ubicado en la Norpatagonia, para evaluar este cultivo como alternativa productiva en función de sus atributos de adaptabilidad a condiciones adversas y de variedad de ciclos de cultivo que le permiten desarrollarse adecuadamente con buenos rendimientos de calidad forrajera y nutricional.

### **1.11. El Amaranto**

La palabra **amaranto** proviene del griego y significa “la que no se marchita, la imperecedera”. Este nombre se debe a que las flores del amaranto, cualquiera sea su especie, se mantienen por mucho tiempo después de cortadas sin perder su color. Una vez cortada la flor asume un aspecto más delicado y bonito, por esta razón es utilizada también como planta ornamental que simboliza la inmortalidad.

Tanto *Amarantus* y *Amaranthus* fueron usados en los siglos XVI y XVII. Linneo conoció ambos términos y reemplazó el nombre clásico de *Amarantus* por *Amaranthus*. El género *Amaranthus* de Linneo incluye especies que se originaron en América, África y Eurasia. En cuanto a su denominación vulgar el amaranto recibe numerosos nombres tales como: *kiwicha* (Cusco, Perú), *achita* (Ayacucho, Perú), *coyo* (Cajamarca, Perú), *achis* (Huaraz, Perú), *coimi*,

*millmi* e *Inca pachaqui* o *grano Inca* (Bolivia), *sangorache*, *ataco*, *quinua de castilla* (Ecuador), *alegría* y *huanthi* (México), *rejgira*, *ramdana*, *eeerai* (India). En el período de colonización los españoles, debido a la semejanza de esta planta con ciertas plantas europeas, la denominaban “bledo” o “cenizo” (Mujica *et al.*, 1997).

### **1.11.1. Taxonomía**

La clasificación taxonómica para el amaranto según FAO es la siguiente (Mujica *et al.*, 1997):

Reino: Vegetal

División: Fanerógamas

Tipo: Embryophyta, Siphonogama

Subtipo: Angiospermas

Clase: Dicotiledoneae

Subclase: Archyclamideae

Orden: Centrospermales

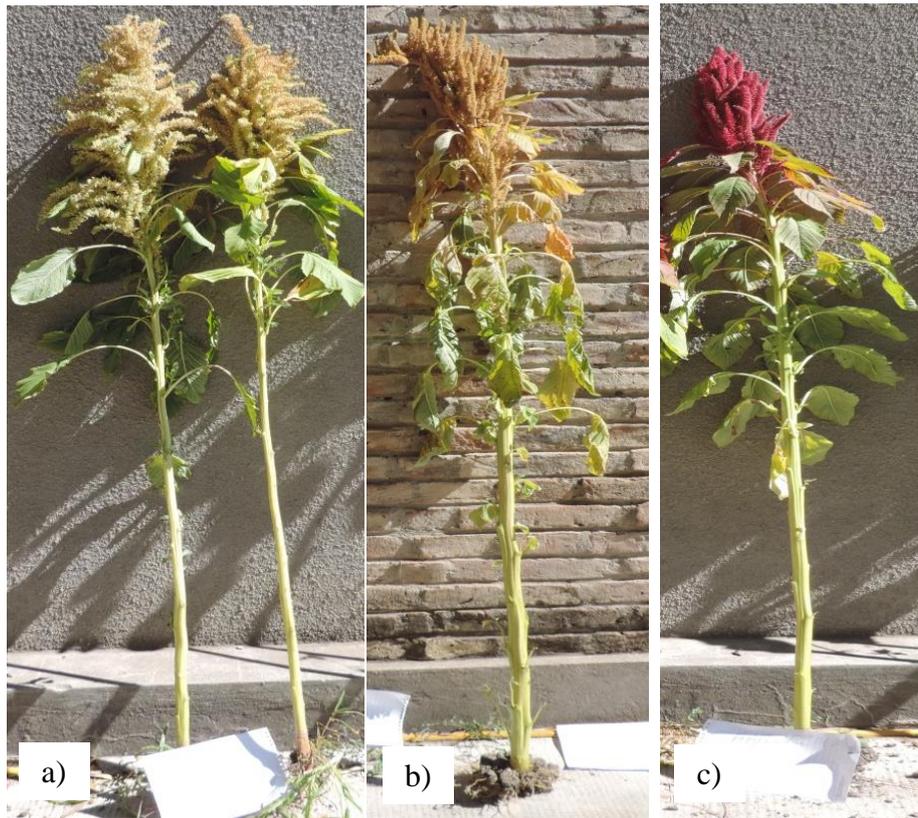
Familia: Amaranthaceae

Género: *Amaranthus*

Especies: *caudatus*, *cruentus* e *hypochondriacus*

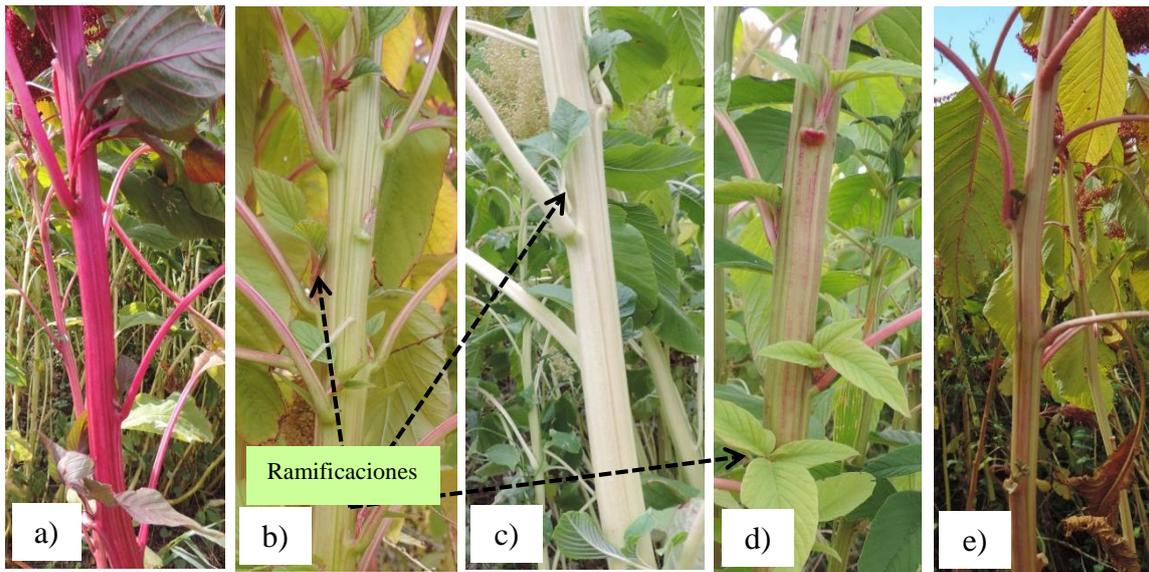
### **1.11.2. Morfología de la planta**

Este género se caracteriza por presentar plantas herbáceas o arbustivas, de ciclo anual, que alcanzan en algunos casos 2,5 m de altura (Figura 1.2). El tallo por lo general presenta un sólo eje central con ramificaciones desde la base hacia el ápice (Mazón *et al.*, 2003).



**Figura 1.2.** Planta entera de amaranto. a) *A. cruentus* cv Mexicano; b) *A. hypochondriacus* cv Dorado; c) *A. hypochondriacus* cv Antorcha. Fuente: Producción propia.

Los tallos son erectos, succulentos, cilíndricos y angulosos, su grosor disminuye desde la base al ápice, presentan estrías longitudinales y su coloración comúnmente coincide con el color de las hojas aunque suelen presentarse ejemplares con estrías de diferente coloración (Chagaray, 2005). Las ramificaciones (Figura 1.3), conjunto de hojuelas no mayores a los 5 cm de longitud que se originan en las axilas de las hojas, varían en número y tamaño según la densidad del cultivo y la especie (Sauer, 1967; Sumar Kalinowski, 1982; NRC, 1984).



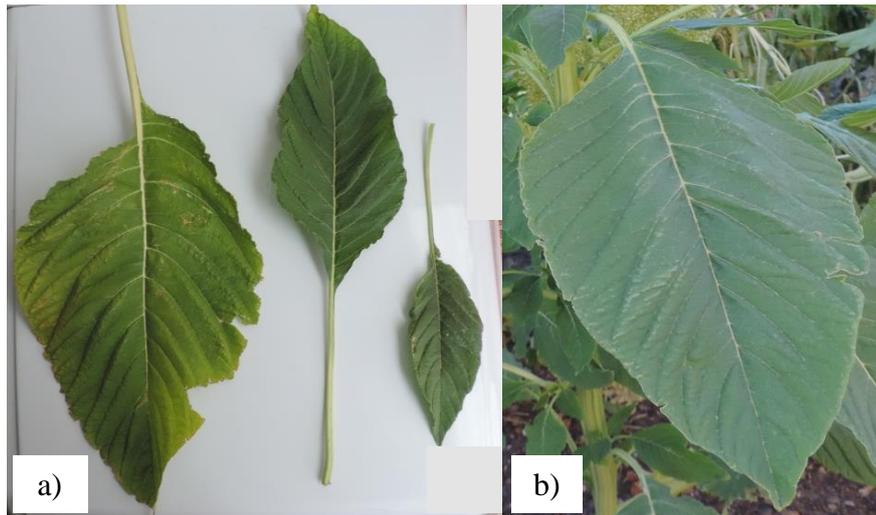
**Figura 1.3.** Ramificaciones y diferentes coloraciones de tallos de amaranto. a) *A. cruentus*; b) *A. hypochondriacus* x *A. cruentus*; c) *A. hypochondriacus*; d) *A. cruentus*; e) *A. hypochondriacus*. Fuente: Producción propia.

Es una especie de raíz pivotante con abundantes ramificaciones que se extienden para facilitar la absorción de agua y nutrientes (Figura 1.4). La raíz principal es quien cumple la función de sostén de la planta y mantiene el peso de la panoja (Sumar Kalinowski, 1993).



**Figura 1.4.** Raíz principal y ramificaciones de *A. cruentus* cv Mexicano. Fuente: Producción propia.

Las hojas son pecioladas y carecen de estípulas, pueden ser ovales o elípticas de borde entero (Figura 1.5) con disposición opuesta o alterna, de tamaño variable disminuyendo desde la base al ápice, lisas o poco pubescentes, de color verde o púrpura, con nervaduras prominentes en el envés (Figura 1.6) (Mujica y Berti, 1997).



**Figura 1.5.** Hojas de la planta de amaranto. a) *A. cruentus*; b) *A. hypochondriacus*. Fuente: Producción propia.



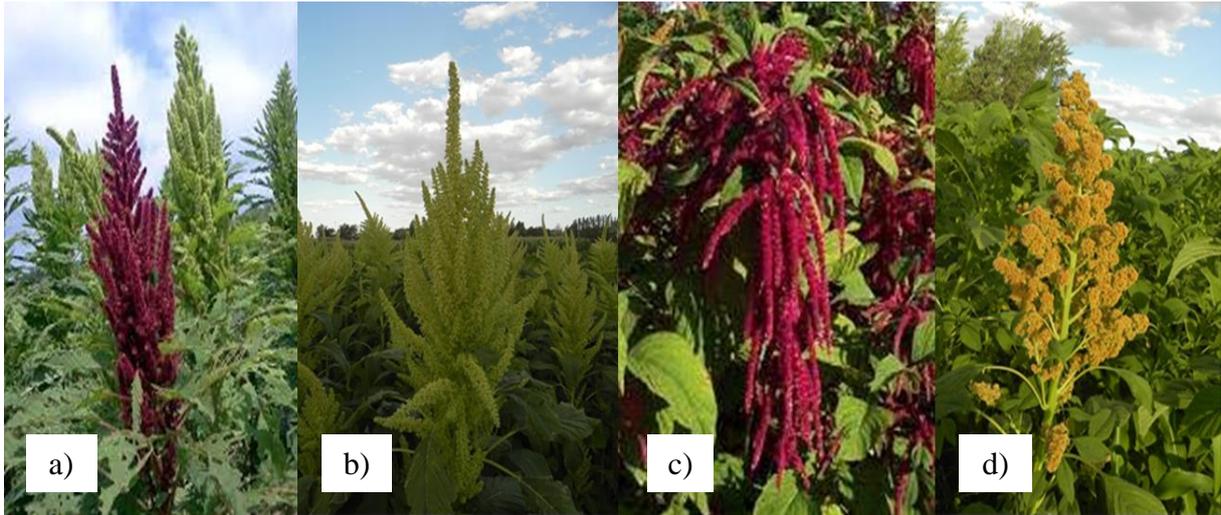
**Figura 1.6.** Detalle de nervaduras de la hoja de *A. cruentus*. Fuente: Producción propia.

Los amarantos son plantas monoicas, dioicas o polígamas con grandes inflorescencias muy vistosas llamadas panojas, las cuales pueden ser terminales o axilares, erectas o decumbentes. Las flores son unisexuales y de pequeño tamaño, agrupándose las mismas en glomérulos (Figura 1.7). En cada glomérulo la primera flor es terminal y siempre masculina, en su base nacen dos flores laterales femeninas, cada una de ellas origina otras dos flores laterales femeninas y así sucesivamente. Un glomérulo puede presentar alrededor de 250 flores femeninas y sólo una flor masculina, la cual una vez que expulsa el polen se seca y cae (Pal y Khoshoo, 1974).



**Figura 1.7.** Flores dispuestas en glomérulo de *A. hypochondriacus*. Fuente: Producción propia

Las inflorescencias son de tamaños variables y colores diversos desde el verde al morado, presentándose también coloraciones intermedias como amarillo, anaranjado, café, rojo, rosado, hasta el púrpura (Figura 1.8).



**Figura 1.8.** Formato de la inflorescencia de amaranto. a) *A. hypochondriacus*; b) *A. cruentus*; c) *A. caudatus*; d) *A. mantegazzianus*. Fuente: Producción propia.

El fruto botánicamente se denomina pixidio unilocular es decir, una cápsula que al madurar deja caer su parte superior, llamada opérculo, y deja expuesta la inferior, denominada urna, donde se encuentra la semilla (Figura 1.9). Este fruto presenta dehiscencia transversal que facilita la caída de la semilla (Sánchez Marroquín, 1980; Nieto, 1990). Sin embargo, existen algunas especies de amaranto con pixidios indehiscentes, característica que puede ser transferida a cultivares comerciales (Brenner y Hauptli, 1990).



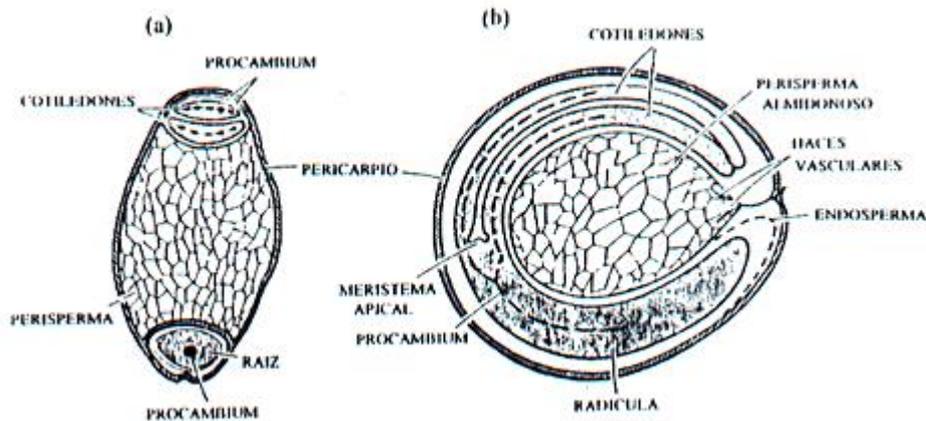
**Figura 1.9.** Esquema de pixidio unilocular de amaranto. Fuente: <http://img.botanicayjardines.com/amaranthus-retroflexus-427/01-amaranthus-retroflexus-semilla-medium.jpg>

La semilla es pequeña, algo aplanada, lisa, brillante de 1-1,5 mm de diámetro, de color blanco, aunque existen de colores amarillentos, dorados, rojos, rosados, púrpuras y negros (Figura 1.10). El número de semillas varía de 1000 a 3000 por gramo y el peso de 1000 semillas ronda entre 0,6 y 1 gr (Sauer, 1967; Nieto, 1990; Kigel, 1994). Una planta de amaranto puede producir más de 50.000 semillas, aunque sólo una parte de estas llega al suelo para germinar y dar una planta adulta (Morales *et al.*, 1988).



**Figura 1.10.** Semilla de amaranto en tamaño real. Fuente: [http://breadandtortillas.files.wordpress.com/2013/09/dsc\\_0224.jpg](http://breadandtortillas.files.wordpress.com/2013/09/dsc_0224.jpg)

En la semilla se diferencian tres capas (Figura 1.11): el epispermo que es la capa exterior y que cumple la función de la cubierta seminal; la segunda capa es muy rica en proteínas y está formada por los cotiledones; y la capa más interna, llamada perisperma, rica en almidones (Irving *et al.*, 1981). Las especies silvestres presentan granos de color negro con el episperma muy duro.



**Figura 1.11.** Diagrama de secciones transversal (a) y longitudinal (b) de semilla de amaranto. Fuente: <http://www.leader-trade.com/wp-content/uploads/2011/11/diagramme1.gif>

### 1.11.3. Polinización del cultivo de amaranto

En el género *Amaranthus* debido a su biología floral, las primeras flores femeninas suelen tener sus estigmas receptivos antes que las flores masculinas se abran; las restantes flores pistiladas se desarrollan después que las flores masculinas han caído de la inflorescencia. Dentro de la misma inflorescencia existen cimas de diferente edad, con lo cual el polen puede transferirse a flores femeninas receptivas lo que permite la autopolinización (NRC, 1984).

Los amarantos cultivados se caracterizan por presentar un sistema de reproducción mixto con niveles variables de polinización cruzada según el genotipo y el ambiente (Kulakow y Jain, 1990; Espitia, 1991). Los valores de polinización cruzada varían entre 7,6 y 41%. Sin embargo, la autopolinización ocurre más comúnmente, por lo tanto dentro de una población los niveles de polinización cruzada de plantas individuales varía desde completamente autógena a completamente alógama (Espitia, 1994).

Las especies con sistemas de apareamiento mixto pueden tener un alto nivel de variabilidad genética dentro de las poblaciones. En estos casos la pérdida de variabilidad genética puede ocurrir como resultado de la selección artificial de líneas puras (Mapes Sánchez y Espitia,

2010). El sistema de reproducción del amaranto permite utilizar métodos de mejoramiento tanto de plantas autógamas como de alógamas (Sauer, 1967).

Estudios realizados han hallado incompatibilidades genéticas entre las especies graníferas de amaranto. De los cruzamientos realizados se analizaron la variabilidad y la fertilidad de todos los híbridos de la F1, donde *A. caudatus* y *A. cruentus* rindieron pocas semillas y las mismas murieron luego de cuatro semanas de germinadas. La cruce entre *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* presentó rendimientos bajos en semilla y la mayoría de las plántulas murieron. De las plántulas sobrevivientes un porcentaje era estéril. Los cruzamientos entre *A. hypochondriacus* y *A. caudatus* fueron más exitosos, pudieron madurar y autopolinizarse con generaciones F2 y F3. Aunque el polen producido por estas generaciones presentó baja fertilidad (Gupta y Gudu, 1991).

Por otra parte, un trabajo de investigación analizó un conjunto de semillas de 3 especies de amaranto (*A. cruentus*, *A. caudatus*, y *A. lividus*) en condiciones de autopolinización y de polinización cruzada durante cuatro ciclos de producción. El resultado obtenido estableció que las poblaciones de estas especies son polimórficas con plantas autoestériles y autofértiles. Dentro de las poblaciones las plantas auto-estériles fueron quienes tuvieron un mayor porcentaje de representación, mientras que las autofértiles eran sólo el 34,7%, 18,7% y 12,5% para *A. cruentus*, *A. caudatus*, y *A. lividus* respectivamente. Durante el primer año de aislamiento se halló un elevado nivel de autofertilidad, que disminuyó considerablemente durante los años posteriores debido al efecto de la endogamia (Zheleznov *et al.*, 2001).

La depresión por endogamia ocurre debido al apareamiento entre parientes, lo cual puede ocasionar deformaciones y baja viabilidad en los descendientes. Entre las características de este fenómeno podemos mencionar: manifestación de recesivos, pérdida de vigor, mayor

mortalidad, aumento de esterilidad y rápida diferenciación entre familias. Comúnmente los caracteres más afectados por consanguinidad son los del tipo reproductivo además de los morfológicos y fisiológicos (Cubero, 2003).

Estas características de incompatibilidad de especies genera la necesidad de investigar con el objetivo de tener información para poder realizar mejoramiento y conservación de los recursos genéticos de este cultivo (Gupta y Gudu, 1991).

#### **1.11.4. Requerimientos climáticos y fisiológicos del cultivo de amaranto**

El amaranto debido a la gran diversidad y variabilidad genética que posee ha mostrado un sin número de características morfofisiológicas, sanitarias, agronómicas, nutricionales e industriales de importancia. Este género tiene una amplia distribución que va desde ambientes tropicales hasta semiáridos. Tradicionalmente se cultivaba en regiones comprendidas entre el Ecuador y los 30° de latitud sin embargo, puede cultivarse en latitudes mayores si se utilizan materiales capaces de florecer aun cuando no se alcance el fotoperíodo de los trópicos (NRC, 1984).

El amaranto pertenece al grupo de plantas denominado C<sub>4</sub>, cuyo proceso fotosintético la hace más eficiente en la utilización de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) disponible en el aire a través de la concentración de éste en los cloroplastos de las células especializadas que rodean los haces vasculares de las hojas. Estas plantas carecen de fotorrespiración, proceso que produce pérdida de CO<sub>2</sub> en las plantas que poseen la clásica vía C<sub>3</sub> (ciclo de Calvin), compuesto necesario para la producción de carbohidratos. Por este motivo las plantas con vía C<sub>4</sub> poseen una mayor tasa de transformación de carbono atmosférico a azúcares por unidad de agua perdida respecto de las C<sub>3</sub>. Esta ventaja de las C<sub>4</sub> de mantener tasas elevadas de CO<sub>2</sub> puede observarse aun cuando los estomas están parcialmente cerrados, tal es el caso de un estrés ambiental como puede ser

sequía o salinidad. Por este motivo las plantas C<sub>4</sub>, como es el caso del amaranto, manifiestan mejores rendimientos que las especies C<sub>3</sub> en condiciones adversas. La capacidad de fotosintetizar a tasas elevadas, aún bajo condiciones de alta temperatura, es otra ventaja fisiológica de las plantas con vía C<sub>4</sub>. (Hauptli y Jain, 1977; NRC, 1984; Nieto, 1990).

#### **1.11.4.1. Respuesta al fotoperíodo**

Gran parte de las especies de amaranto son sensibles a la longitud del día. Como regla general podemos decir que el género *Amaranthus* crece vegetativamente en días largos y florece cuando los días comienzan a acortarse (U.S. Department of Agriculture, 1979)

Ensayos realizados por Fuller mostraron que *A. caudatus* era capaz de florecer bajo condiciones de fotoperíodo de 8 horas. Mientras que, al someterlo a condiciones de iluminación mayores a 12 horas permanecía en estado vegetativo. En condiciones de luz continua las plantas mostraron anormalidades como: caída temprana de hojas, clorosis y crecimiento retardado de la raíz principal (Fuller, 1949).

Por su parte, *A. retroflexus* responde a ciclos inductivos de día corto, con sólo 3 días bajo estas condiciones luego de emergida la plántula, era suficiente para apreciar la aparición microscópica del primordio floral (Koller *et al.*, 1977).

Ensayos realizados en *A. caudatus* demostraron que no requiere condiciones de día corto para florecer hasta no alcanzar su estado sensitivo. Una vez alcanzado este estado de desarrollo o período inductivo, 30 días después de la germinación, ocurre la floración con sólo 2 días de inducción (Zabka, 1961).

#### **1.11.4.2. Requerimientos hídricos**

Las plantas C<sub>4</sub>, como el amaranto, crecen más rápidamente que las C<sub>3</sub> y utilizan aproximadamente cerca de las 3/5 partes de la cantidad de agua requerida por una planta C<sub>3</sub>

para producir la misma cantidad de biomasa (Hauptli, 1977). El ajuste osmótico es otra estrategia de este cultivo que le permite tolerar cierto grado de escasez de agua sin marchitarse ni morir. La cantidad de agua requerida por el mismo durante su ciclo de vida es aproximadamente el 60% de lo requerido por el trigo o la cebada (Wang *et al.*, 1985). Otra investigación menciona que el amaranto requiere la mitad de agua que usualmente necesitan las plantas comunes (Vietmeyer, 1982).

Para lograr una buena germinación de las semillas de amaranto se requiere de buena humedad en el suelo aunque, una vez establecidas las plántulas, pueden crecer adecuadamente incluso con limitantes de agua. El amaranto posee la particularidad de crecer mejor en condiciones de baja disponibilidad hídrica y altas temperaturas (NRC, 1984).

Este cultivo no prospera bien en zonas desérticas. Pese a ello, en áreas de bajas precipitaciones por ejemplo donde usualmente se siembra sorgo y mijo manifiesta un excelente potencial productivo (Kauffman *et al.*, 1984; Kauffman y Hass, 1984; Weber *et al.*, 1989). El amaranto para producción de grano ha sido cultivado tanto en condiciones de secano donde percibe aproximadamente unos 200 mm anuales así como en zonas con precipitaciones de 3000 mm anuales (NRC, 1984).

#### **1.11.4.3. Respuesta a la altitud y a la temperatura**

El amaranto crece favorablemente desde el nivel del mar hasta por encima de los 3.200 m de altura, por esta razón se dice que este cultivo no presenta limitaciones severas debido a la altitud. Es importante destacar que *A. caudatus* es el único que prospera en altitudes superiores a 2.500 msnm.

El desarrollo de este cultivo se ve favorecido por temperaturas diarias no menores a 21°C. Algunos materiales han mostrado una adecuada germinación en un rango de temperaturas entre

16 y 35°C. Por encima de 35°C se logran mayores velocidades de emergencia y con temperaturas de 40°C se alcanza la mayor eficiencia fotosintética del cultivo. Temperaturas de 8°C retardan el crecimiento, mientras que valores inferiores a 4°C ocasionan daños en la planta (NRC, 1984). *A. caudatus* al ser originaria de zonas de mayor altitud se adapta mejor a temperaturas más bajas y puede resistir algunas heladas mientras que, *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* han mostrado tolerancia a altas temperaturas, sin embargo, no resisten heladas. (Grubben y Van Sloten, 1981).

#### **1.11.4.4. Requerimientos edáficos**

El amaranto manifiesta un adecuado desarrollo en una amplia variedad de suelos y bajo distintas condiciones de drenaje (Martineau, 1985). En los Estados Unidos ha sido cultivado satisfactoriamente en suelos francos, suelos de pradera y en suelos salinos. El amaranto es sensible a suelos pesados, dado que los mismos inciden sobre el crecimiento de las raíces y por lo tanto sobre el desarrollo de la planta en general. Suelos ligeros y con buen drenaje son los más recomendados para un cultivo óptimo. El mejor comportamiento se observa en los suelos francos (Kauffman *et al.*, 1984; Weber *et al.*, 1989).

El cultivo tiene la capacidad de crecer en un amplio rango de pH de suelos que van desde valores ácidos hasta valores fuertemente alcalinos (4,5-8,5) destacándose su tolerancia a la presencia de aluminio y sales en el suelo (Hauptli, 1977). A pesar de ello, se ha demostrado que el cultivo muestra un mejor comportamiento en suelos de pH básico o neutro (NRC, 1984).

## **1.12. Manejo del cultivo**

### **1.12.1. Preparación de la cama de siembra**

Previo a la preparación del suelo se debe tener en cuenta la elección del sitio de siembra. Es importante considerar el grado de infestación de malezas, dado que las mismas ejercerán competencia sobre el cultivo y en muchos casos hay especies del mismo género que el amaranto, las cuales son muy difíciles de distinguir al momento de realizar el desmalezado (Tavitas y Hernández, 2012).

La preparación del terreno debe ser lo más eficiente posible debido al pequeño tamaño de la semilla, se requiere de una cama de siembra mullida para lograr un buen contacto de la semilla y el suelo. En suelos livianos basta con una pasada de rastra de discos, mientras que en suelos pesados puede requerir de otro rastreo cruzado (Tavitas y Hernández, 2012).

En zonas donde hay fuerte incidencia de malezas, es conveniente realizar un riego pre-siembra luego de la preparación del suelo para provocar la germinación y emergencia de las mismas y a continuación realizar un control químico mediante la aplicación de un herbicida sin efecto residual. Otra opción, es realizar una nueva pasada de rastra para un control mecánico (Trinidad *et al.*, 1990; Mujica *et al.*, 1997).

### **1.12.2. Siembra**

La siembra puede realizarse de manera directa o mediante trasplante en surcos de aproximadamente 10 cm de profundidad y separados 60-70 cm entre sí. Dentro del surco se puede sembrar a chorrillo o en golpes (10-20 semillas por golpe) cada 20 cm (Nieto, 1990).

Es importante dejar caer la semilla a poca altura del suelo, dado que por su pequeño tamaño y peso puede ser desviada por el viento fuera del surco (García Pereyra, 2004). Para lograr una distribución uniforme se recomienda mezclar la semilla con arena o inertes (Henderson *et al.*, 1993). La semilla se cubre luego con una delgada capa de suelo de 1-2 cm (Nieto, 1990). Otra

forma de realizar la siembra es de manera mecánica, mediante una sembradora de hortalizas o de cereales de grano fino con la precaución de no enterrar demasiado la semilla (García Pereyra, 2004).

Se recomienda realizar un riego pre siembra para lograr la humedad necesaria para una correcta emergencia. Si se realiza un riego luego de la siembra se corre el riesgo de producir un encostramiento de la superficie del suelo con posibles fallas en la emergencia (Mujica *et al.*, 1997).

La densidad de siembra varía en función de la calidad de semilla y del sistema utilizado. Por lo general se trabaja con 4 a 6 kg de semilla ha<sup>-1</sup> para obtener una densidad de aproximadamente 100-150 mil plantas ha<sup>-1</sup> (Mujica *et al.*, 1997; Tavitas y Hernández, 2012). Sin embargo, la densidad de plantas puede variar según las condiciones agroclimáticas y la especie utilizada.

### **1.12.3. Elección de la fecha de siembra y la variedad**

La época de siembra está relacionada con a la ubicación de la zona de cultivo y a la frecuencia y volumen de las precipitaciones (González y Rojo, 2005). La elección de la variedad también se relaciona con las condiciones agroclimáticas y la fecha de siembra. Si la variedad seleccionada se siembra fuera de época esta reducirá notablemente sus rendimientos. Por lo tanto, la fecha de siembra está íntimamente relacionada con el ciclo de la variedad y las condiciones agroclimáticas donde se llevará a cabo el cultivo (Mujica *et al.*, 1997).

Se recomienda realizar la siembra en primavera de manera de asegurarle a la semilla una adecuada humedad para su germinación y emergencia, aunque esta práctica no suele adecuarse a zonas semiáridas. Así, siembras de primavera demasiado tempranas pueden ocasionar, debido a la probabilidad de ocurrencia de las heladas tardías, retrasos en la emergencia, germinación desapareja del cultivo e incluso la pérdida de plantas (Tavitas y Hernández, 2012).

#### **1.12.4. Densidad de plantas**

Para maximizar rendimientos es importante conocer la respuesta del cultivo a la densidad de plantas ya que ciertos rasgos morfológicos responden a este parámetro. Esta respuesta varía según la especie, el genotipo y del ambiente en el que se desarrolla. Altas densidades reducen el número de ramificaciones, el tamaño de la planta, el número de panojas secundarias, el diámetro del tallo y ocasionan una maduración menos uniforme (Haas, 1983; Arellano Vásquez, 2000). Trabajos con altas densidades mostraron incrementos en la producción de semilla y un menor porcentaje de vuelco de plantas (Bansal *et al.*, 1995).

#### **1.12.5. Fenología del cultivo**

Los diferentes estadios fenológicos del amaranto han sido descritos por Mujica y Quillahuamán (1989), posteriormente y coincidiendo con ellos, Henderson caracteriza las siguientes etapas: emergencia, fase vegetativa, fase reproductiva, panojamiento, anthesis, llenado de granos, madurez fisiológica, madurez de cosecha (Mujica y Quillahuamán, 1989; Henderson, 1993).

#### **1.12.6. Desmalezado y raleo**

El cultivo presenta un crecimiento lento al comienzo del ciclo por lo que el desmalezado se torna de vital importancia para evitar la competencia que ejercerán las malezas. El número de veces en la que debe realizarse el control depende de la incidencia de malezas (Mujica *et al.*, 1997).

Este cultivo es muy susceptible en sus primeros estadios de desarrollo a la competencia por agua, luz y nutrientes. Por tal motivo se recomienda realizar un primer control cuando las plántulas tengan 10-15 cm de altura y un segundo control a los 30 días del primero (Mujica *et al.*, 1997). Transcurrido el primer mes el cultivo crece rápidamente y cubre el suelo lo cual

permite independizarse de esta tarea. Una vez establecido el cultivo se efectúan los raleos necesarios para lograr el número de plantas deseado por unidad de superficie, se eliminan las plantas más pequeñas, débiles, atípicas o enfermas si las hubiese (Nieto, 1990; Monteros *et al.*, 1994).

El desmalezado se realiza de manera manual dado que aún no se han hallado herbicidas que actúen de manera selectiva. Realizado el desmalezado se recomienda efectuar el aporque de las plantas (NRC, 1989; Nieto, 1990; Trinidad *et al.*, 1990).

### **1.12.7. Fertilización**

El amaranto se desarrolla adecuadamente en suelos de diverso contenido nutricional aunque, estudios realizados informan que la fertilización permite obtener plantas de mayor tamaño y con mejor rendimiento en grano. Para un óptimo desarrollo de la planta requiere niveles adecuados de potasio y nitrógeno en el suelo (NRC, 1984).

La aplicación de fertilizantes se encuentra relacionada con la disponibilidad de humedad, la fertilidad propia del suelo en donde se va a sembrar, del cultivo antecesor, y la especie a sembrar, dado que las distintas especies de amaranto responden de manera diferencial a la cantidad de fertilizante aplicado (Elbehri *et al.*, 1993; Fasina *et al.*, 2008). De manera tal que los requerimientos nutricionales del amaranto están definidos por las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo y por la especie a sembrar.

El amaranto responde positivamente a la fertilización nitrogenada, debido a que este elemento resulta restrictivo en el crecimiento de un cultivo (Stallknecht y Schulz Schafer, 1993). La misma respuesta fue hallada con la fertilización fosforada, donde algunos trabajos reportan un ligero incremento en el rendimiento conforme se aumenta la dosis de fósforo (Gupta y Thimba, 1992). Trabajos realizados por López (1989), mostraron que aplicaciones a

bajas dosis de potasio contribuyen a un mejor aprovechamiento del nitrógeno y del fósforo por las plantas, hecho que influye en la disminución del vuelco de plantas y la reducción de daños causados por enfermedades.

El nitrógeno por su elevada solubilidad y movilidad en el suelo se recomienda aplicarlo en dosis fraccionadas en 2 partes y en suelos de textura gruesa donde la lixiviación de nutrientes es alta, se recomienda hasta 3 aplicaciones. Es importante que al momento de la aplicación el suelo se encuentre húmedo y para un mejor aprovechamiento por parte de las plantas el fertilizante debe cubrirse con una delgada capa de suelo (Mujica *et al.*, 1997).

Otra forma de realizar la fertilización del cultivo es en forma orgánica, la cual se fundamenta en el aprovechamiento de la biomasa de las plantas, residuos vegetales post-cosecha, excrementos animales, lodos residuales, desechos industriales, agroindustriales y urbanos, ya sea en estado sólido, líquido o semilíquido que procesados y aplicados al suelo mejoran sus condiciones físicas, químicas y biológicas (Soto, 2003).

#### **1.12.8. Cosecha y trilla**

La cosecha se realiza cuando la planta presenta signos de madurez tales como, hojas secas en la base del tallo y amarillentas hacia el ápice de la planta; cierta dehiscencia en la base de la panoja; granos duros y muy difíciles de romper (González y Rojo, 2005). Las panojas pueden cortarse manualmente con un elevado costo de mano de obra (Figura 1.12). Esta actividad debe realizarse en horas tempranas del día para reducir el desprendimiento del grano.



**Figura 1.12.** Cosecha manual del cultivo de amaranto. Fuente: Producción propia.

Una vez cortadas las panojas, se forman pilas que quedan al sol para que se continúen secando durante unos días y luego se procede a la trilla. Esta labor se puede realizar manualmente, golpeando las panojas o pisoteándolas con animales. La semilla limpia se vendea y se pasa por cribas o tamices (García Pereyra, 2004; Tavitas y Hernández, 2012).

Otra forma es de efectuar la cosecha es por medio de cosechadoras combinadas que realizan al mismo tiempo el corte y trilla en el campo (Figura 1.13). Este tipo de cosecha requiere un cultivo con desarrollo vegetativo, floración y maduración uniforme, plantas resistentes al vuelco, y panojas no decumbentes con resistencia al desgrane (Tavitas y Hernández, 2012). La mecanización permite realizar el trabajo en menos tiempo y reduce los costos de mano de obra.

Luego de la trilla es conveniente procesar el grano previo al almacenamiento o la comercialización, para ello es necesario que el grano se seque alcanzando valores de humedad del 10-12 %. Este secado puede realizarse al sol o con secadoras convencionales. Las impurezas tales como: ramas, tallos, restos de hojas, brácteas y cubiertas de semilla, deben retirarse para mejorar la calidad del producto, para esto pueden utilizarse cribas y venteo (Nieto, 1990).



**Figura 1.13.** Cosecha mecanizada del cultivo de amaranto. Fuente: Producción propia.

### 1.13. Enfermedades y plagas

El amaranto es un cultivo poco difundido por lo tanto se conoce poco sobre los problemas de plagas y enfermedades que puedan afectarlo.

En el amaranto son pocas las especies de insectos que constituyen plagas de importancia económica, ésto dependerá de las condiciones agroecológicas en las que se lleve a cabo el cultivo. Ante la aparición de ciertas plagas se hace fundamental su control dado que en algunos casos pueden ocasionar la pérdida total del cultivo. En la Argentina se menciona la aparición de *Loxostege bifidalis* o “oruga del yuyo colorado” (Figura 1.14) y *Epicauta adspersa* o “bicho moro” (Figura 1.15). En este último caso los adultos se encuentran en los bordes de las hojas y consumen la parte foliar desde la periferia hacia el interior y en ataques severos practicamente todo el limbo de la hoja (Jacquelin *et al.*, 2011). Ambos insectos fueron encontrados en los ensayos realizados en esta tesis.



**Figura 1.14.** Ataque de “oruga del yuyo colorado” *Loxostege bifidalis*. Fuente: [http://elnuevoagro.com.ar/files/717852\\_2011\\_08\\_15\\_Amaranto2011\\_INTAPerg.pdf](http://elnuevoagro.com.ar/files/717852_2011_08_15_Amaranto2011_INTAPerg.pdf)



**Figura 1.15.** Daños foliares ocasionados por “bicho moro” *Epicauta adspersa*. Fuente: Producción propia

En relación a la incidencia de otras plagas este cultivo puede verse afectado por aves, las cuales pueden reducir los rendimientos hasta en un 45% debido a que consumen los granos maduros y dañan la inflorescencia lo que produce la caída de semillas al suelo. Los roedores pueden causar daños considerables por el consumo de las semillas almacenadas así como por la contaminación con sus deyecciones (Mujica *et al.*, 1997).

Entre las posibles enfermedades del cultivo de amaranto se mencionan algunas causadas por hongos, micoplasmas, virus y diversas fisiopatías. Las de mayor impacto observado son las

afecciones ocasionadas por hongos y fisiopatías (Nieto, 1990; Monteros *et al.*, 1994; Mujica *et al.*, 1997; Mapes Sánchez y Espitia, 2010; Estrada Zuniga, 2011).

### 1.13.1. Enfermedades causadas por hongos

La incidencia de enfermedades causadas por hongos puede ocurrir desde estadios iniciales del cultivo hasta en la madurez del mismo con reducciones en la densidad de población de plantas y el rendimiento. Entre ellas se pueden mencionar: tizón del amaranto cuyo agente causal es la *Alternaria* spp, mancha negra del tallo causada por *Macrophoma* sp., esclerotiniosis producida por *Sclerotinia sclerotiorum*, cercosporiosis del amaranto causada por el hongo *Cercospora* sp. o *C. brachiata*, pudriciones o "Damping off" producida por *Phytium* sp. o *P. aphanidermatum*, *Fusarium* sp., *Rhizoctonia* sp., roya blanca causada por *Albugo bliti*, pudrición húmeda producida por *Choanephora cucurbitarum*, oidium producida por *Erysiphe* sp., *Curvularia* sp., y *Volutella* sp (Mujica *et al.*, 1997, Tapia *et al.*, 2007, Fuentes Fernández *et al.*, 2014). En el caso particular de la mancha negra del tallo se ha observado su manifestación en la zona de estudio (Figura 1.16).



**Figura 1.16.** Mancha negra del tallo en cultivo de amaranto. Fuente: producción propia.

Para evitar la aparición de estas enfermedades es recomendable utilizar semilla de semilleros reconocidos, desinfectar la semilla con fungicidas, evitar el exceso de humedad en el suelo y eliminar plantas enfermas al inicio del ataque.

### **1.13.2. Fisiopatías**

Entre las enfermedades causadas por agentes abióticos podemos mencionar las bajas temperaturas y heladas que pueden presentarse durante el desarrollo vegetativo o bien en las fases más sensibles de este cultivo como son la floración y el panojamiento. A temperaturas menores a los 4°C se reduce el crecimiento de la planta y puede ocurrir daño mecánico a causa del congelamiento con pérdida parcial o total de la producción. El estadio vegetativo es el que mejor tolera las bajas temperaturas. Cuando la helada ocurre durante la formación de la inflorescencia se produce el "Colgado de la panoja" debido al daño causado en la parte basal de la misma. La panoja crece con aspecto decumbente si logra recuperarse. En cambio, si la helada afecta en el estadio de floración puede causar esterilidad de la planta debido al daño de estambres y órganos florales. Cuando la helada ocurre durante el llenado del grano causa el chupado de las semillas produciendo granos vacíos o vanos (García Pereyra, 2004).

El granizo puede ocasionar la destrucción del área foliar, de la panoja en desarrollo y la caída de semillas maduras si ocurre durante el llenado del grano o durante la maduración del mismo. En todos los casos se reduce la producción, aunque la incidencia en el cultivo dependerá de la intensidad del fenómeno (Estrada Zuniga, 2011).

Los excesos de humedad en el suelo ya sea por precipitaciones o por altas frecuencias de riego pueden causar pérdidas en la producción sobre todo en los primeros estadios del cultivo debido a que favorece el desarrollo de pudriciones radiculares, vuelco de plantas y mayor

incidencia de enfermedades. El déficit hídrico afecta en las etapas de germinación, emergencia y hasta inicio de ramificación, momentos en que el amaranto es más susceptible. Una vez que la planta ha desarrollado su sistema radicular en profundidad se vuelve más tolerante a la falta de agua (Estrada Zuniga, 2011).

Las deficiencias de nutrientes en general ocasionan una reducción de la producción de materia seca y bajos rendimientos en granos (Estrada Zuniga, 2011).

#### **1.14. Planta modelo de amaranto o “Ideotipo”**

El ideotipo cambiará según el programa de fitomejoramiento, el ambiente y las demandas de la industria alimentaria. Las siguientes características describen una planta ideal de amaranto (Mujica *et al.*, 1997):

- Tamaño de planta reducido y con panoja grande, compacta y erecta. Por lo general las plantas de amaranto presentan gran porte con panoja de considerable peso que las hace susceptibles al vuelco. El formato de la panoja es otro atributo a tener en cuenta desde el punto de vista de la mecanización del cultivo.
- Tiempo de maduración óptimo de acuerdo a la zona de cultivo según las condiciones climáticas y duración del día. El amaranto generalmente presenta corto período vegetativo y rápida maduración. La duración del ciclo de la planta varía según la zona y de un genotipo a otro sin embargo, debido a la gran variabilidad de genoplasmas que existen se han encontrado amarantos con períodos de madurez que varían de 70 a 240 días.
- Uniformidad de maduración de granos en la panoja, puesto que la desuniformidad provoca dehiscencia la cual ocasiona pérdidas importantes y dificulta la cosecha mecanizada.
- Sincronización de maduración planta/semilla. En muchas ocasiones las plantas muestran sus granos maduros aún con un alto contenido de humedad en la planta. Al efectuar la cosecha se manifiesta la presencia de granos húmedos que requieren de secado posterior para evitar

que los mismos fermenten o se pudran. Mejorar esta sincronización favorecería la mecanización del cultivo.

- Altos rendimientos.
- Satisfacer las exigencias de agricultores y de la industria, por ejemplo: resistencia a plagas, enfermedades y sequía; facilidad de reventado o molienda del grano; alto contenido de proteína.

Para complementar el ideotipo antes descrito se sugiere una altura de planta que varíe entre 1 y 1,5 m, con semilla de tamaño grande, de color blanco y vigorosa (Kauffman y Weber, 1990). Para lograr este ideal de planta se requiere de un intenso trabajo de investigación y mejoramiento, lo cual permitiría aprovechar el destacado potencial que tiene el amaranto y la gran colección de germoplasma disponible (Brenner *et al.*, 2000).

### **1.15. Calidad nutricional del amaranto**

Los análisis de composición nutricional de este cultivo indican que los valores de proteína cruda, grasa, fibra y cenizas son comúnmente más elevados que los obtenidos en los cereales, y el contenido de carbohidratos es menor (Betschart *et al.*, 1979; Saunders y Becker, 1984; Singhal y Kulkarni, 1988). Estas características lo hacen atractivo para su utilización en elaboraciones culinarias, en la industria plástica, cosmetológica y otras. (NRC, 1984).

El germen y el salvado constituyen el 26% de la semilla, al moler el grano sus proteínas, vitaminas, grasas y minerales se concentran de manera significativa en estas fracciones. El germen no sólo presenta un contenido elevado de proteína sino también valores próximos al 20% de aceite. El salvado es rico en fibra, proteínas, vitaminas y minerales. Los valores de almidón oscilan entre 52,4 y 70% (Becker *et.al*; 1981).

Los principales azúcares encontrados en el amaranto han sido sacarosa, glucosa, rafinosa y fructosa. La sacarosa es el azúcar encontrado en mayor proporción en todas las especies de amaranto, sin embargo, su concentración es menor a la de otros granos (Saunders y Becker, 1984).

Numerosos autores mencionan que el grano de amaranto presenta valores de proteína del 14 al 17% con un óptimo balance de aminoácidos (Downton, 1973; Betschart *et al.*, 1979; Singhal y Kulkarni, 1988; Bressani, 1989, Lehmann, 1990; Barba de la Rosa *et al.*, 1992). Por su composición, la proteína del amaranto es similar a la de la leche y se aproxima a la proteína ideal propuesta para la alimentación humana (Mujica *et al.*, 1997). Tiene un contenido importante de lisina, aminoácido comúnmente limitante en otros cereales. Así mismo, presenta un bajo contenido de leucina, lo cual no es una limitación dado que este aminoácido se encuentra en exceso en la mayoría de los granos comunes. Por lo tanto, podría existir una complementación entre los aminoácidos esenciales del amaranto y los presentes en otros cereales (Segura Nieto *et al.*, 1994).

De acuerdo con la clasificación de Osborne las proteínas de reserva del amaranto están constituidas mayoritariamente por albúminas, globulinas y glutelinas (Breener, 1991; Segura Nieto *et al.*, 1994). Comparaciones entre la composición nutricional de la semilla de amaranto, con respecto al trigo, soja y leche de vaca, han encontrado que el amaranto supera al resto en calidad de proteína (Betschart *et al.*, 1979). El valor biológico de la proteína de amaranto es 75. Este valor es más próximo que el de otros cereales (maíz 44, trigo 60, soja 68) e incluso que el valor biológico de leche de vaca (72) al perfecto equilibrio de aminoácidos que tendría una puntuación de 100 en la escala nutricional de máxima calidad de proteína (NRC, 1984).

Las diferentes especies de amaranto muestran valores de contenido de grasas que rondan entre el 6,1 y 10,9%, encontrándose mayormente la fracción lipídica en la testa-embrión de la semilla (Becker *et al.*, 1981; Berger *et al.*, 2003). La importancia de los lípidos está dada por el elevado contenido de ácido linoleico, ácido graso esencial precursor de las prostaglandinas, que es suministrado sólo por los vegetales. El escualeno es otro compuesto que se destaca en el aceite de amaranto, es un terpenoide precursor de la biosíntesis del colesterol y por este motivo es utilizado en cosmética y medicina. El aceite de amaranto es relativamente rico en tocoferoles (vitamina E) y tocotrienoles (Becker, 1981; Breener, 1991, Plate Areas, 2002). Estos últimos son análogos insaturados de la vitamina E, que poseen acción reguladora en el metabolismo del colesterol, en la actividad antitumoral y alta capacidad antioxidante *in vitro* (Lehmann *et al.*, 1994; Escudero *et al.*, 2004).

El contenido de minerales de las semillas de amaranto suele variar entre las distintas especies (Becker *et al.*, 1981; Singhal y Kulkarni, 1988). Cuando esta fracción se determina como cenizas de incineración, el amaranto supera notoriamente a otros cereales concentrándose mayormente en el germen/cáscara (Betschart *et al.*, 1981; Saunders y Becker, 1984). El amaranto presenta altos valores de calcio (6,5 mg/100g) y magnesio, por lo que es un alimento que podría ser utilizado en la prevención de osteoporosis (Becker *et al.*, 1981). Entre los factores antinutricionales encontramos ácido oxálico, alcaloides, compuestos cianogénicos, saponinas, inhibidores de la tripsina y taninos pero en valores similares a los encontrados en legumbres y otros granos, no considerándose de riesgo nutricional. En algunas ocasiones suele ocurrir acumulación de nitratos en niveles similares a los encontrados en espinaca, los cuales son de fácil tratamiento mediante el hervor de las hojas que permite la remoción de la mayor parte de los nitratos y el ácido oxálico queda disuelto en el agua (NRC, 1984).

### 1.16. Usos del amaranto

Para la alimentación humana suele utilizarse el grano entero o su harina, así como las hojas que son consumidas como hortaliza luego de hervirlas para realizar puré, sopas y tortillas. Con los granos se preparan postres, papillas, tortas, budines, bebidas, dulces, barras de cereal, sopas, panes, cereales para desayuno, galletitas así como según el país, distintos platos más elaborados como por ejemplo el atole en México (NRC, 1984; Singhal y Kulkarni, 1988; Mujica *et al.*, 1997).

La harina de amaranto suele utilizarse en combinación con otras harinas como fuente de microelementos y vitaminas. En la fabricación de pan se recomiendan valores de hasta un 20% dado que niveles mayores producen un pan de baja calidad con menor volumen y textura gruesa (Brommer y Morgenstern, 1992). En algunos casos se ha incluido hasta un 25% en mezclas para la fabricación de espaguetis sin cambios importantes en color, sabor y calidad culinaria, pero con un mayor contenido de proteína y lisina que los fabricados con trigo candeal (Necoechea *et al.*, 1986; Rayas Duarte *et al.*, 1996).

Del amaranto se obtienen colorantes vegetales, principalmente amarantina que se utiliza para la coloración de alimentos dando colores vistosos. Sus tallos son utilizados para la fabricación de cartones debido a su alto contenido de celulosa. Otro uso común en la industria es como aglutinante para espesar ciertos alimentos. El escualeno, componente importante de los lípidos de este grano, es utilizado en la industria de la cosmética como lubricante de máquinas (Mapes Sánchez y Espitia, 2010).

En medicina se utiliza el grano de amaranto por: sus propiedades hipocolesterolémicas; su contenido de niacina importante para el desarrollo de hormonas sexuales, del crecimiento y del metabolismo. Su contenido de lisina es significativo para la producción de hormonas, anticuerpos y enzimas. Su aporte de fósforo considerable en el funcionamiento renal y en la formación de los huesos. Su contenido de magnesio importante en el metabolismo del azúcar en sangre y como relajante del músculo liso. Los tocoferoles (vitamina E) y tocotrienoles han demostrado tener actividad antitumoral, y antioxidante (Mapes Sánchez y Espitia, 2010). Por otro parte por ser naturalmente libre de gluten, el amaranto podría ser incorporado en la dieta celíaca (Green y Cellier, 2007).

El amaranto puede ser utilizado como planta ornamental debido a la gran variabilidad de formas de su inflorescencia y a sus vistosos colores.

Otro uso de este cultivo es como planta forrajera por su amplia capacidad de adaptación a diferentes ambientes y destacada eficiencia fotosintética y del recurso hídrico (Svirskis, 2003). Previa formación de la inflorescencia puede utilizarse como forraje para alimentar ganado, generalmente en combinación con otras especies forrajeras. Debido a su alto rendimiento en biomasa y su elevado contenido de proteínas se utiliza para elaborar concentrados proteicos (Masoni y Ercoli, 1994).

Algunas investigaciones indican que el valor nutritivo del amaranto como forraje es similar al de otros forrajes utilizados comúnmente con muy buena calidad nutricional en ciertas etapas del desarrollo (Rezaei *et al.*, 2009). La calidad del forraje verde parece disminuir con el desarrollo de la planta, observándose una reducción en el contenido de proteína cruda y un aumento en los contenidos de fibra detergente neutro, fibra detergente ácida, y lignina detergente ácida (Stordahl *et al.*, 1999; Písaríkova *et al.*, 2007).

Durante el estado vegetativo produce de 10 a 11 ton ha<sup>-1</sup> de materia seca con una cantidad de pared celular del 19%, estos valores varían según la especie y condiciones de desarrollo por ejemplo, se han hallado en *A. retroflexus* valores del 24% (Putnam, 2001).

Los granos pueden ser utilizados solos o en combinación con otros granos para la alimentación de aves de corral y porcinos. El porcentaje recomendado de este grano en las dietas de aves varía entre 20-25% dado que concentraciones mayores requieren el procesado del grano para no alterar la ganancia de peso vivo y la salud de las aves (Valdivié *et al.*, 1989; Cervellini *et al.*, 1994).

Todas las aplicaciones mencionadas del cultivo de amaranto constituyen las principales las fortalezas de esta producción, sin dejar de considerar las dificultades que este presenta para la producción a escala del mismo. Podemos resumir estas características en la siguiente serie de ventajas y desventajas (Tabla 1.1).

**Tabla 1.1.** Ventajas y desventajas del cultivo de amaranto.

| Ventajas  | Desventajas  |
|---|--|
| Presenta un importante contenido y calidad proteica, similar al de la proteína ideal  | Poca difusión sobre su calidad nutricional y su versatilidad.  |
| Es un cultivo alternativo a las siembras de maíz, trigo, cebada, sorgo y avena.   | Existe falta de conocimiento de las técnicas de producción de este cultivo.  |
| Puede ser utilizado de diversas maneras en la alimentación humana así como también en la alimentación de animales.                        | La falta de mecanización genera un elevado requerimiento de la mano de obra para la siembra, cosecha y trilla, y altos costos de producción. |
| El grano de amaranto no posee gluten, por lo que es un alimento apto para celíacos  | No existe uniformidad genética   |
| Su cultivo no demanda excesiva humedad para su desarrollo y producción, adaptándose además a una amplia gama de ambientes edafoclimáticos | Maduración desigual de la panoja con un alto porcentaje de frutos dehiscentes que ocasionan pérdidas en el rendimiento.                      |
| Puede utilizarse la tecnología agrícola disponible para la producción del grano.  | Poseen un grano muy pequeño haciéndolo susceptible a condiciones desfavorables en la siembra.  |
| Es un cultivo con pocos problemas sanitarios.   | El precio del mercado se mantiene casi constante, debido a la concentración del producto en pocos comerciantes.                              |
| La semilla conserva su calidad durante mucho tiempo.  |  |

**Fuente:** García Pereyra, 1994; Mujica *et al.*, 1997; Mapes Sánchez y Espitia, 2010.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES**

---

### **2.1. Localización**

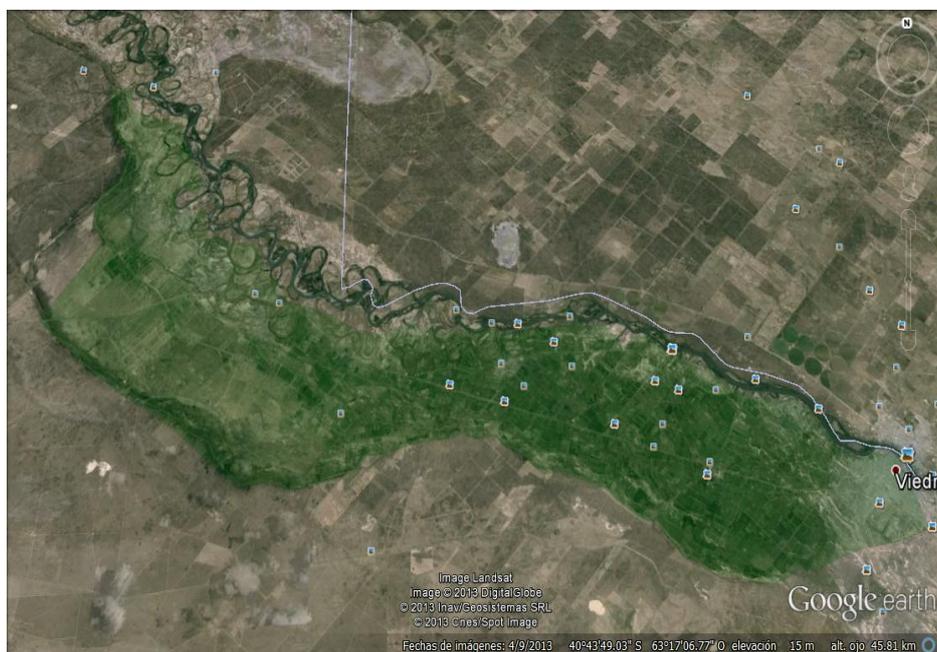
El Valle Inferior de Río Negro se encuentra ubicado en la ribera del río del mismo nombre, en el SE de la Provincia de Río Negro (Argentina) y abarca desde el paraje conocido como Primera Angostura hasta la desembocadura en el océano Atlántico. Se extiende en dirección NO-SE entre los 40° 36' - 40° 48' LS y 63° 00' - 63° 30' LO con una longitud de 100 km y un ancho medio de 8 km (Figura 2.1). Topográficamente el valle presenta una llanura con suave pendiente hacia el mar y una altitud media de 4 msnm, con algunas depresiones que no sobrepasan los 2 m. La superficie total del valle ronda las 80 mil hectáreas de las cuales pueden acondicionarse para riego aproximadamente 65 mil ha (IDEVI, 2010).

La zona agrícola bajo riego del Valle Inferior de Río Negro se encuentra localizada en el denominado proyecto IDEVI (Instituto de Desarrollo del Valle Inferior), que corresponde a un área de 18.500 ha sistematizada para el riego superficial y organizada en explotaciones cuya superficie varía entre las 30 y 120 ha (IDEVI, 2010). El proyecto IDEVI iniciado en la década del '60 puso mediante su plan de colonización en sucesivas adjudicaciones, 526 chacras bajo riego en condiciones de ser utilizadas para la producción agrícola. La mayoría de las explotaciones originalmente se destinaron a producciones intensivas, para las cuales era imprescindible el uso de agua de riego. Los modelos productivos se centraban en la actividad frutihortícola, complementándose con sistemas ganaderos destinados a recuperar los suelos en rotación con estas producciones intensivas (Alder, 2010).

Las unidades productivas se encuentran divididas por acequias en lotes de 3-5 ha, rodeadas por cortinas forestales de especies de álamos para protección de los cultivos de los efectos del viento (Peri, 2004). En el espacio interpredial encontramos una red de caminos de ripio que comunican las chacras entre si y a las mismas con las rutas nacional N° 3 y provincial N°1. El sistema de riego está conformado por una extensa red de canales de conducción de agua que

alimentan cada chacra. Esta obra cuenta con un canal principal o primario de una extensión cercana a los 90 km del cual derivan una serie de canales de menor jerarquía denominados secundarios y terciarios. El sistema se complementa con una red de canales de similar extensión destinados a drenaje, con el objetivo de mantener la capacidad productiva de los lotes, dado que permite el lavado de aquellos suelos afectados por condiciones de salinidad y/o alcalinidad (Alder, 2010).

La mayor parte de la superficie productiva en la actualidad se destina a la producción de especies forrajeras, mayormente alfalfa y pasturas consociadas. Las otras producciones que se desarrollan son, en importancia decreciente: frutales principalmente de frutos secos; cereales (maíz y avena); cebolla, zapallo y horticultura diversificada. Las actividades ganaderas de importancia son el engorde de vacunos y ovinos en pasturas irrigadas. Recientemente se iniciaron actividades más intensivas como engorde a corral y producción porcina (INTA, 2013).



**Figura 2.1.** Imagen satelital del Valle Inferior del Río Negro. Fuente: <https://earth.google.com/>

El río y el mar actúan como moderadores de los valores térmicos de la región, como resultado el valle inferior tiene un clima semiárido y mesotermal (Peri, 2004). De acuerdo a los registros históricos la temperatura media mensual es de 14°C y la amplitud térmica hace a la zona adecuada para el desarrollo de una amplia variedad de cultivos. El período libre de heladas es de 164 días y las fechas medias de primera y última helada son el 1° de mayo y el 12 de octubre respectivamente (Alonso y Rebay, 1995). El viento se hace presente en esta región durante todo el año, con velocidades que van desde un rango moderado a muy fuertes. La precipitación media es de 391,2 mm con una distribución casi homogénea a lo largo del año. La estación primavera-estival, que es la de mayor importancia desde el punto de vista agrícola, se caracteriza por presentar un ambiente seco y con alta demanda hídrica. Las precipitaciones en este período son deficitarias, lo que imposibilita realizar cultivos durante gran parte del año sin el aporte suplementario de agua (Berasategui, 2002).

Dentro del valle se encuentran dispersas quince series de suelos con variaciones texturales que van desde finas a gruesas con distinto grado de afección de sales como consecuencia de intrusiones marinas que incidieron en el origen de los suelos (Masotta, 1970).

## **2.2. Sitio experimental**

Los ensayos efectuados en esta tesis fueron realizados en lotes del predio de la Estación Experimental Agropecuaria Valle Inferior del Río Negro (convenio Provincia de Río Negro – INTA) en adelante mencionada como EEAVI, ubicada en parcelas del proyecto IDEVI en las coordenadas geográficas: latitud 40° 48`S; longitud 63° 05`O y altitud de 4 msnm. En este establecimiento los suelos pertenecen a la serie Chacra, de textura arcillosa a franco-arcillo-limosa, de relieve plano a ligeramente deprimido, con drenaje imperfecto a moderadamente bien drenado. Las sales solubles y el sodio intercambiable se concentran en los horizontes

superiores. El material calcáreo y/o yeso se encuentra en proporciones variables generalmente por debajo de los horizontes afectados por sales (Masotta, 1970).

El sitio experimental cuenta a su vez con buena disponibilidad hídrica de calidad para efectuar los riegos necesarios durante el ciclo del cultivo (Tabla 2.1).

**Tabla 2.1.** Calidad de agua de riego del Valle Inferior del Río Negro.

| Muestra       | N-NH <sub>4</sub><br>(mg/L) | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>(mg/L) | Ce<br>(mmhos/cm) | RAS |
|---------------|-----------------------------|--|------------------|-----|
| Agua de riego | 2.1                         | 1.1                                      | 0,35             | <1  |

**Fuente:** Realizado en el Laboratorio de Análisis Químicos CERZOS-CONICET-UNS (LANAQUI). C.E (conductividad eléctrica), N-NH<sub>4</sub> (nitrógeno amoniacal), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (nitratos), RAS (Relación adsorción sodio).

El sistema de riego más utilizado por los productores de la zona es el gravitacional (Figura 2.2), donde el agua se mueve por efecto de la gravedad según las diferencias de altura del terreno, es decir el agua se desliza por la pendiente sin requerir energía extra para su movimiento.

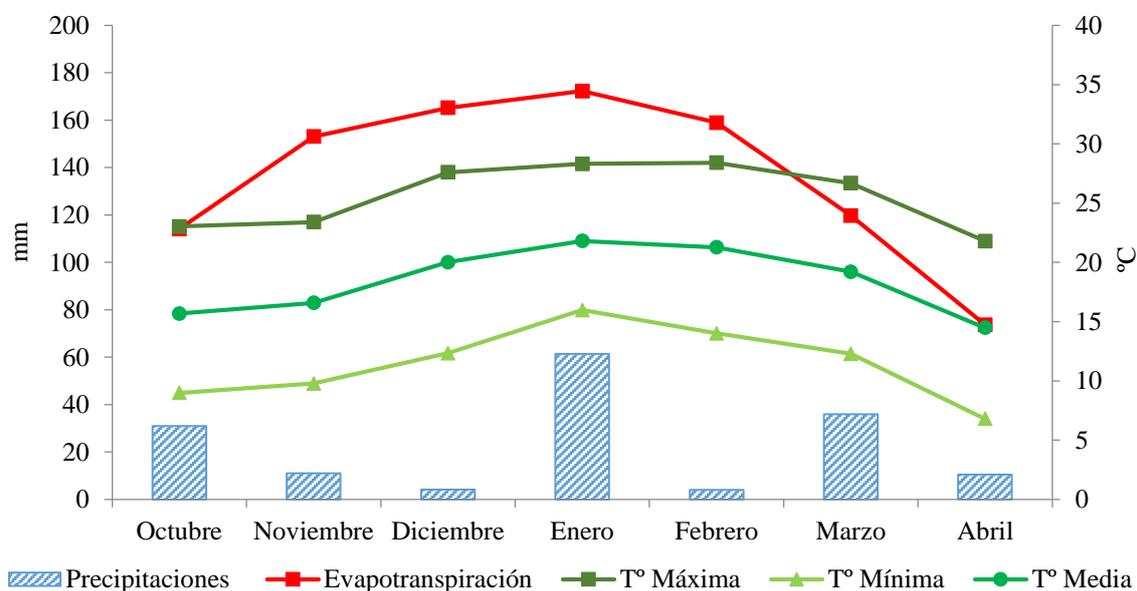


**Figura 2.2.** Riego de parcelas de ensayo mediante método gravitacional. Fuente: Imagen de producción propia.

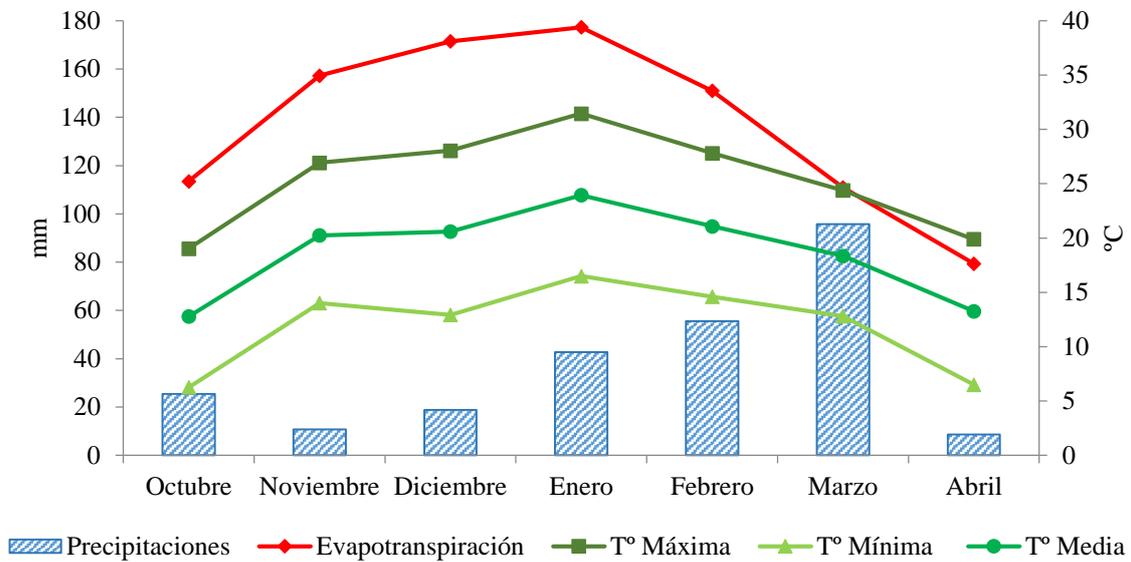
En el riego gravitacional la distribución del agua desde el centro de almacenamiento ocurre a través de grandes canales con puntos de distribución que reparten el agua por acequias medianas y pequeñas hasta llegar a la parcela. Esta metodología de riego fue utilizada para realizar los ensayos experimentales a campo descritos en esta tesis.

### 2.3. Ciclos de cultivo

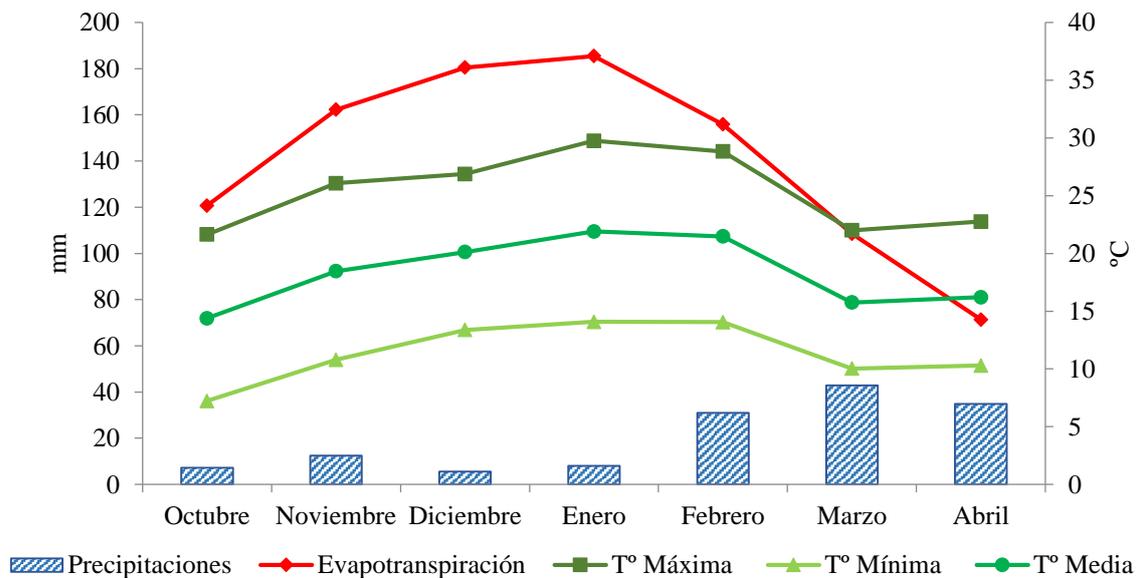
Los ensayos se llevaron a cabo durante cuatro años consecutivos en los ciclos productivos 2010-2011; 2011-2012; 2012-2013 y 2013-2014. Las condiciones de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración se registraron a través de la estación meteorológica de la EEAVI (Figura 2.3 a 2.6).



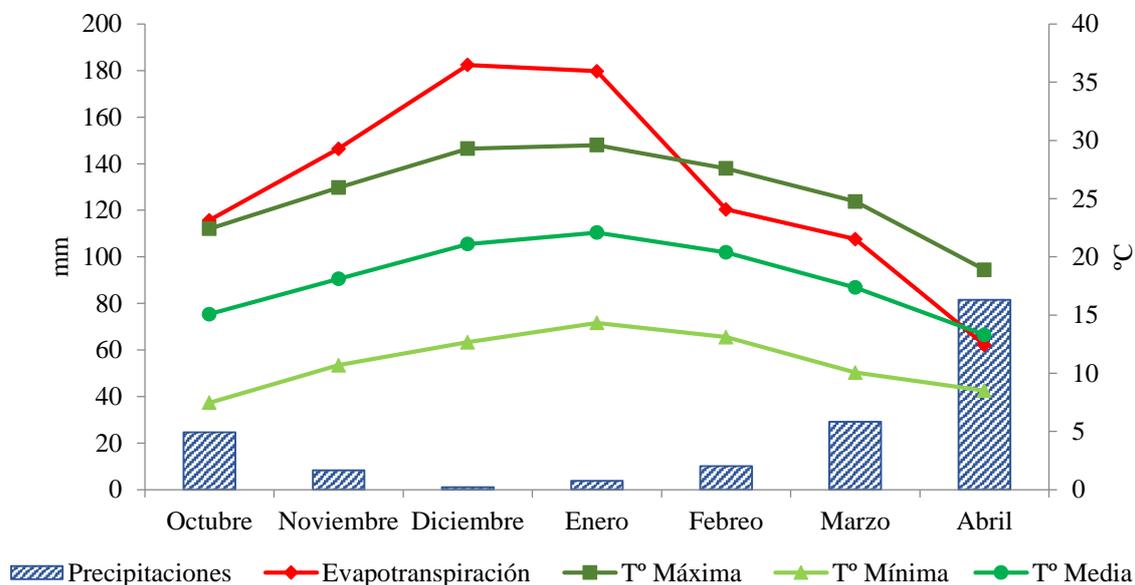
**Figura 2.3.** Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2010-2011. Fuente: Estación meteorológica de la EEAVI.



**Figura 2.4.** Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2011-2012. Fuente: Estación meteorológica de la EEAVI.



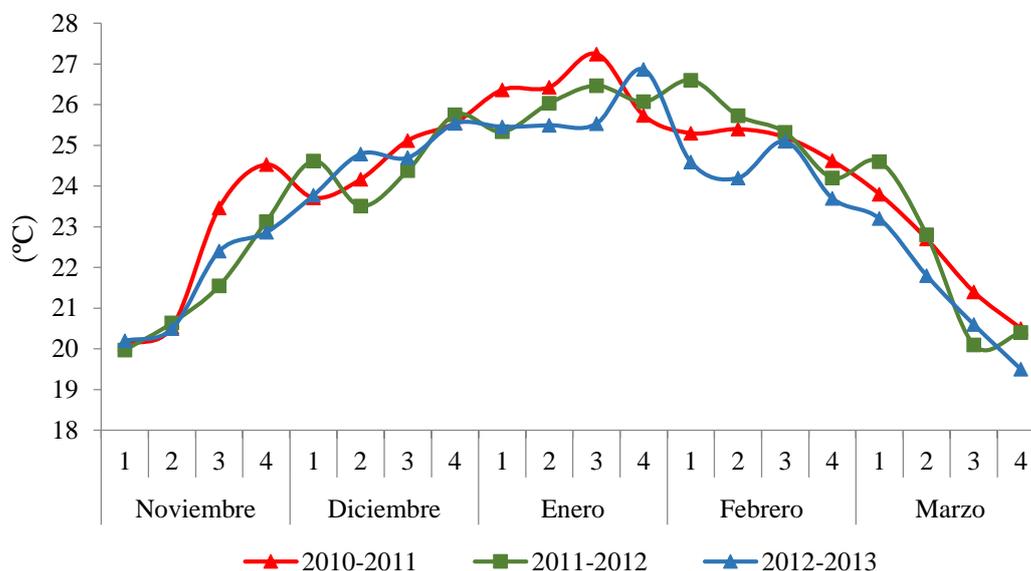
**Figura 2.5.** Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2012-2013. Fuente: Estación meteorológica de la EEAVI.



**Figura 2.6.** Valores de temperatura, evapotranspiración y precipitaciones para el sitio experimental durante el ciclo productivo 2013-2014. Fuente: Estación meteorológica de la EEAVI.

Por otra parte, las variables meteorológicas de radiación circunglobal y de heliofanía efectiva fueron consideradas a partir de la estadística climática de la zona de estudio durante el período 1965-1994 (Martin, 2009).

Durante el transcurso de los ciclos productivos ensayados se llevó a cabo el registro de la temperatura del suelo. Para esto se utilizó un data logger Cavadevices TC 1047 de 4 canales con 4 sensores de temperatura. El instrumento fue seteado para tomar 4 registros por hora para cada hora del día, los cuales fueron promediados semanalmente. La temperatura de suelo a 10 cm de profundidad se mantuvo entre 19 y 25°C lo que permitió altos porcentajes de germinación y emergencia de plántulas (Figura 2.7).



**Figura 2.7.** Temperatura de suelo promedio a 10 cm de profundidad para los ciclos productivos de experimentación.

#### 2.4. Manejo del cultivo

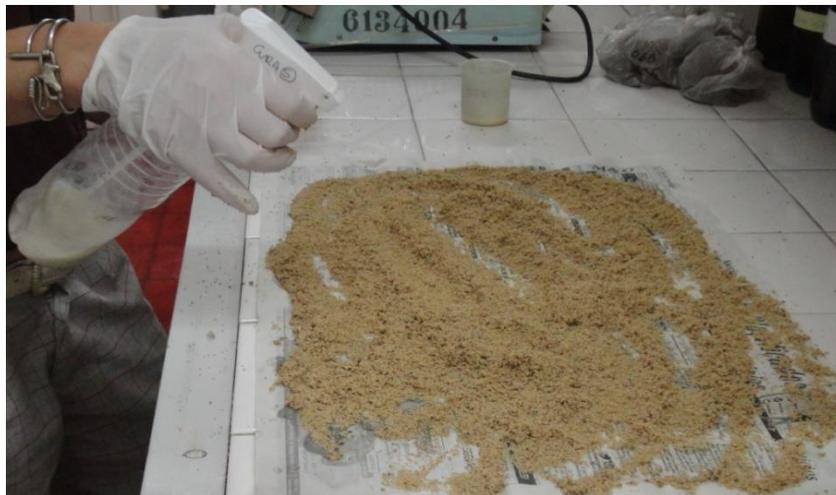
Las labores culturales realizadas previo a la siembra consistieron básicamente en una pasada de rastra pesada, dos pasadas de cincel, dos pasadas de rastra liviana, surqueado, riego y aplicación de herbicida presiembra para el control de malezas (glifosato a dosis de 4 l ha<sup>-1</sup>). Luego de trabajado el suelo se delimitaron las parcelas experimentales y se distribuyeron al azar los tratamientos correspondientes a cada ensayo. Previo a la siembra se efectuaron muestreos de suelo con el objetivo de conocer las características fisicoquímicas de cada parcela experimental, resultados que son detallados en cada capítulo.

La siembra se realizó a chorrillo de manera manual (Figura 2.8) y a una profundidad no mayor a 1,5 cm con la semilla previamente curada (Figura 2.9). Para ello se utilizó una mezcla de Captan y Benomil a razón de 120 ml cada 100 Kg de semilla para protegerla durante la

siembra y en la etapa de germinación de la acción perjudicial de hongos alojados en la misma semilla o en el suelo.



**Figura 2.8.** Siembra manual a chorrillo. Fuente: Imagen de producción propia



**Figura 2.9.** Metodología de curado de semillas. Fuente: Imagen de producción propia.

Una vez emergidas las plántulas el control de malezas fue fundamental, el mismo se realizó manualmente hasta que las plantas alcanzaron un porte de 50-60 cm de altura (Figura 2.10). Una vez que las plantas lograron este desarrollo ejercían una adecuada competencia con las

malezas, lo cual permitió independizarse de esta tarea. En ese momento se realizaron los raleos necesarios para establecer la densidad de plantas deseada en cada ensayo y el aporque de las mismas.



**Figura 2.10.** Desmalezado manual de parcelas experimentales. Fuente: Producción propia

Para la aplicación del riego durante el ciclo de cultivo se consideró el contenido de agua en el suelo del sitio experimental y los parámetros de punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC). Para ello una vez aplicado el riego el suelo se dejó drenar hasta que finalizó el movimiento de agua por gravedad, momento en el que se determinó la humedad volumétrica y cuyo valor se denominó capacidad de retención o CC. A continuación el suelo se sometió a un proceso de succión hasta que llegó a un valor consensuado de potencial mátrico de -15 bar, donde se determinó nuevamente la humedad volumétrica para establecer PMP. La cantidad de agua volumétrica entre CC y PMP se denomina “reserva útil” ó “intervalo de humedad disponible”. Las plantas tienen mayor dificultad para absorber agua a medida que la humedad volumétrica se acerca al PMP, por ello se consideró que un déficit no mayor al 65%

de la reserva útil sería admisible (Gardner, 1986). Las determinaciones de CC y PMP para los ensayos del presente trabajo fueron realizados por el laboratorio de la Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur (Anexo).

Paralelamente y basándose en las propiedades físico-químicas del suelo se utilizaron “funciones de edafotransferencia” o “funciones de pedotransferencia” para la estimación de PMP y CC por medio del modelo de Saxton y Rawls (Gupta y Larson, 1979; Rawls *et al.*, 1982; Kern Jeffrey, 1995; Bonilla y Cancino, 2001, Saxton y Rawls, 2006). Estos valores fueron comparados con los resultados obtenidos mediante succión en laboratorio. Esta relación resultó aceptable, y debido a la practicidad y bajo costo de esta metodología, la misma fue utilizada para conocer el estado hídrico del suelo en muestras extraídas en cada tratamiento el día anterior y 48 horas después de cada riego.



**Figura 2.11.** Muestreo de suelo mediante utilización de barreno. Fuente: Producción propia.

Para determinar la humedad volumétrica cada muestra extraída con barreno (Figura 2.11) se colocó en un recipiente herméticamente cerrado y se trasladó al laboratorio para el registro inmediato del valor de peso húmedo (PH). Luego se colocó en estufa a 105°C hasta peso constante para registrar el valor de peso seco (PS). El contenido de humedad de la muestra se determinó mediante fórmula:

$$W (\%) = \frac{\text{Peso de suelo húmedo (PH)} - \text{Peso de suelo seco (PS)}}{\text{Peso de suelo seco (PS)}} \times 100$$

La fertilización se efectuó en forma localizada (cerca de la posición de las plantas), fraccionada en dos etapas según lo recomendado por Soto (2003). La primera aplicación cuando las plantas presentaban alturas próximas a los 60 cm y la segunda en los inicios de la etapa de floración. El fertilizante utilizado fue urea granulada (46% N) y la dosis incorporada como nitrógeno (N) de 90 Kg ha<sup>-1</sup> (Figura 2.12). El momento de aplicación del fertilizante se realizó antes de un riego para favorecer la incorporación de la urea al suelo y reducir las pérdidas por volatilización.



**Figura 2.12.** Fertilización manual de parcelas experimentales de amaranto. Fuente: Producción propia.

Durante los años de experimentación tuvo incidencia el insecto plaga “bicho moro” (*Epicauta adspesa spp*) el cual se controló mediante aplicaciones de insecticida Clorpirifos 48% p/v EC (concentrado emulsionable) a razón de 150 cc hl<sup>-1</sup>. Este producto se utilizó en solución acuosa en 2 aplicaciones realizadas con mochila para cada uno de los años de ensayo respectivamente.

El cultivo presentó susceptibilidad a la enfermedad denominada “mancha del tallo” (*Macrophoma spp*). Esta se manifestó durante los años de experimentación y para establecer su incidencia se estimó un porcentaje de aparición de la enfermedad en cada una de las parcelas.

En los diferentes ciclos de cultivo se seleccionaron plantas de cada cultivar con ciertas características morfológicas tales como: ausencia de problemas sanitarios, altura entre 150 y 160 cm, panoja compacta, erecta y bien definida. Las panojas de estas plantas fueron encapuchadas mediante una bolsa de tela cuya porosidad permitió el aireado de la misma pero no el ingreso de polen (Figura 2.13). De esta manera, se obligó a los individuos a autopolinizarse reduciendo así la variabilidad genética para preservar las características deseadas.



**Figura 2.13.** Plantas encapuchadas con características morfológicas deseadas para la obtención de semilla. Fuente: Producción propia.

Al momento de la cosecha, estas plantas fueron identificadas según tratamiento y cultivar, trilladas y acondicionadas para ser utilizadas como material de siembra del año siguiente.

La cosecha se realizó manualmente sobre los surcos centrales, eliminando los surcos laterales de cada unidad experimental y un metro en ambos extremos de los surcos centrales, con el objetivo de eliminar el efecto borde. Esta práctica consistió en: corte de la panoja a la altura de su inserción en la planta (Figura 2.14); acondicionamiento del material recolectado en parvas sobre polietileno para su secado (Figura 2.15); volteo de las parvas hasta que las panojas adquirían aspecto seco y se desgranaban fácilmente.

A continuación se realizó el trillado manual de las panojas a través de zarandas o cribas (Figura 2.16); y la limpieza del grano mediante la aplicación de aire forzado para eliminar granza y restos de panoja. El material de cada cultivar fue cosechado, trillado individualmente e identificado por subunidad experimental y tratamiento al cual pertenecía.



**Figura 2.14.** Cosecha manual. Fuente: Producción propia



**Figura 2.15.** Panojas acondicionadas en polietileno para su secado. Fuente: Producción propia.



**Figura 2.16.** Trillado manual. Fuente: Producción propia.

## 2.5. Datos recolectados

Durante el desarrollo del ciclo productivo se llevó a cabo el registro de diferentes variables, que requirieron de la identificación de plantas dentro de cada parcela. Para ello cuando las plantas alcanzaron un porte de 15 cm se tomaron al azar 10 de ellas en cada subparcela. Las mismas fueron debidamente identificadas y numeradas. Sobre estas plantas seleccionadas se determinó el número de hojas visibles (mayores a 2 cm de longitud) a inicio de panojamiento (**HIP**) y se realizó semanalmente hasta el final del ciclo la medición de las variables número de hojas, nudos, ramificaciones y área foliar que permitieron identificar los valores máximos de las mismas que se representaron como **MH**, **MN**, **MR** y **MAF** respectivamente. El área foliar se determinó a partir de hojas (mayores a 2 cm de longitud) y de ramificaciones (ramilletes de hojas mayores a 2 cm de longitud) en conjunto, mediante la utilización de un medidor de área foliar CI-203 (Laser Leaf Area Meter, CID, Inc).

Sobre estas mismas plantas identificadas., al finalizar el ciclo, se efectuaron las restantes mediciones. Para ello las plantas fueron cortadas en la base del tallo y en laboratorio se midió altura a cosecha (**AC**) y longitud de panoja (**Lp**). El diámetro del tallo (**ΦT**) se midió con calibre a 10 cm de la base.

Cada planta muestreada fue seccionada en tallo, hojas, ramificaciones y panoja. Se efectuó el recuento de: número de hojas mayores a 2 cm a cosecha (**HC**); número de ramificaciones a cosecha (**RC**) constituido por ramilletes de hojas mayores a 2 cm de longitud y área foliar a cosecha (**AFC**). Esta última abarca hojas y ramificaciones cuyas hojas sean mayores a 2 cm de longitud.

Cada una de las secciones antes mencionadas se pesó individualmente y se registró su valor como peso fresco. Las mismas se colocaron en sobres de papel madera correctamente identificados y se llevaron a estufa a 60°C hasta peso constante para obtener peso seco del tallo

(**PSt**), de la panoja (**PSp**) y de las hojas (**PSh**). Este último incluyó el peso de las ramificaciones. La biomasa aérea de planta (**BApt**) se obtuvo sumando los pesos secos de cada una de las secciones.

Una vez obtenido el **PSp** se procedió a la trilla de cada panoja individualmente a través de una zaranda cribada. Los granos obtenidos se limpiaron mediante corriente de aire forzado y fueron pesados para determinar el peso seco de granos por panoja (**PSgp**). Una pequeña muestra de los mismos se llevó a estufa nuevamente a fin de corregir este valor por el contenido de humedad que pudieran haber absorbido durante el proceso de trilla y limpieza. A partir del **PSp** y del **PSgp** se calculó por diferencia el peso seco de la estructura floral (**PSi**).

De los granos obtenidos de cada panoja se obtuvo el peso de mil granos (**P1000**). Para ello se procedió a contar y pesar por triplicado, 500 granos, cuyo peso fue luego multiplicado por 2. El número de granos por panoja (**Ngp**) se obtuvo mediante la relación entre **PSgp** y el **P1000**.

Para determinar el peso seco de granos por unidad experimental (**PSgue**) se cosecharon las panojas de las plantas de los dos surcos centrales de cada parcela, dejando 1 m en ambos extremos del surco con el objetivo de eliminar el efecto de borde. Luego se procedió a la trilla y limpieza de forma similar a descripta anteriormente.

Para obtener el rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico (**Re**) expresado como  $\text{Kg ha}^{-1}$  se relacionó el **PSgue** con la densidad de plantas a cosecha (**Dptc**) y la superficie de la parcela. Para establecer la **Dptc** por parcela se contó el número de plantas en cada parcela al momento de la cosecha, valor que se llevó matemáticamente a densidad de plantas por hectárea (**Dptc ha<sup>-1</sup>**).

Para la determinación de la biomasa aérea por hectárea o rendimiento biológico (**Rb**) expresado en  $\text{Kg ha}^{-1}$  se realizó un cálculo matemático con los datos de BApt, la Dptc y la superficie de la parcela.

Por último se realizó el cálculo del índice de cosecha (**IC**) mediante el cociente entre ambos rendimientos (**Re/Rb**).

Para la evaluación de la condición del cultivo en relación a la incidencia de enfermedades se determinó el porcentaje de plantas enfermas (**%Pe**) con mancha negra del tallo (*Macrophoma sp.*) en cada parcela mediante identificación visual de plantas afectadas.

Por otra parte, durante el desarrollo del ciclo productivo en cada subparcela se identificaron según se describe en el capítulo IV, diferentes estadios fenológicos tales como: días a emergencia (**E**), días a inicio de panojamiento (**IP**) y al 100% del mismo (**100%P**), días a inicio de antesis (**IA**) y al 100% de antesis (**100% A**), días a grano lechoso (**GL**), días a grano pastoso (**GP**), días a madurez fisiológica (**M**). Una vez alcanzado el último estadio se procedió a la recolección de las plantas a campo (cosecha) para proceder a su secado, trilla y acondicionamiento.

Todas las variables fenológicas registradas se expresaron en tiempo cronológico a su vez el estadio de madurez fue expresado en grados días de crecimiento (**GDD**: growing degree days).

Una vez efectuadas las mediciones detalladas anteriormente, se acondicionaron muestras representativas de tallo, hoja y grano según el tratamiento para luego realizar determinaciones de calidad nutricional. El material se procesó a través de un molino estacionario Thomas-Wiley, con una criba de un 1 mm y posteriormente se determinó el contenido de: materia seca (**MS**), cenizas (**Cen**), proteína bruta (**PB**), fibra detergente neutro (**FDN**), fibra detergente ácido (**FDA**), lignina detergente ácido (**LDA**) y digestibilidad (**DMS**) en valores porcentuales sobre base seca (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2.** Metodología de determinación de variables asociadas a la calidad nutricional de tallo, hoja y grano.

| Variable | Método de determinación  |
|----------|--|
| MS       | Secado en estufa a 105°C con ventilación forzada hasta peso constante (AOAC, 1990)                         |
| Cen      | Incineración completa en mufla a 500°C (AOAC, 1990)  |
| FDN      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM                    |
| FDA      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM                    |
| LDA      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM                    |
| PB       | Nitrógeno total por Kjeldhal (AOAC, 1990), equipo Kjeltac 2300 (semi – micro). Factor de corrección: 6,25. |
| DMS      | Cálculo matemático por Ecuación Rohweder, 1978.  |

Para los diferentes ensayos realizados en este trabajo de tesis se efectuó la recolección de los datos antes mencionados según los requerimientos específicos de cada tratamiento evaluado, los cuales serán detallados en los capítulos correspondientes.

### 3. FECHAS DE SIEMBRA Y GENOTIPOS

---

#### 3.1. Introducción

Actualmente ha surgido un mayor interés por nuevos recursos vegetales y nuevos procesos de producción que brinden posibles soluciones al problema de la disponibilidad de alimentos que se debe afrontar para una población en constante crecimiento (Matteuci y Pla, 1998). En nuestro país se han llevado a cabo numerosas investigaciones centradas principalmente en estudios de adaptabilidad de diferentes especies de amaranto provenientes de países como México y Perú entre otros, las que mostraron el gran potencial del cultivo como resultado una de su amplia adaptación ecológica (Covas, 1994). Entre ellas, se destacan las realizadas en la estación experimental agropecuaria INTA Anguil de La Pampa donde se han seleccionado los cultivares Don Juan y Don Manuel de *A. mantegazzianus*, y Don Guien y Don Armando de *A. cruentus* L. los cuales han demostrado altos rendimientos en grano y biomasa (Vargas López *et al.*, 2006).

La familia Amaranthacea está compuesta por aproximadamente 60 géneros que abarcan alrededor de 800 especies, de las cuales las más importantes utilizadas como graníferas son *A. cruentus* L., *A. hypochondriacus* L. y *A. caudatus* (Hunziker, 1991; NRC, 1984).

Luego de varios años de investigación y de intenso proceso de selección, la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) ha registrado ante el Instituto Nacional de Semillas (INASE) cuatro cultivares de amaranto granífero *A. hypochondriacus* L. cv. Candil, *A. hypochondriacus* L. cv. Dorado, *A. hypochondriacus* L. cv. Antorcha y *A. hypochondriacus* L. cv. Chingolo, genotipos de probada adaptabilidad, uniformidad y rendimiento para la región central de la Argentina. Dos de estos cultivares se han utilizado como material genético en algunos ensayos efectuados en esta tesis.

El amaranto presenta un buen comportamiento en una amplia gama de condiciones de clima y suelos, incluso en aquellos ambientes con escasas precipitaciones y con suelos

débilmente estructurados y de bajo contenido de materia orgánica (NRC, 1984). Estas características hacen del amaranto un cultivo interesante para aquellas zonas donde otros cultivos no prosperan adecuadamente y/o como una alternativa para la diversificación productiva.

En nuestro país el área productiva de amaranto comprende las provincias de Jujuy, Santiago del Estero, Córdoba, este de La Pampa y oeste de Buenos Aires (Covas, 1994). Su comportamiento fisiológico permite cultivarlo de manera extensiva con bajos requerimientos tecnológicos y reducida incidencia de plagas y enfermedades, características que favorecen la obtención de altos rendimientos en grano, producto de fácil transformación (Peiretti, 2010).

Numerosos factores fisiológicos y ambientales intervienen en el crecimiento de un cultivo y determinan el potencial productivo del mismo, dado que inciden en el rendimiento. Por lo tanto, es de fundamental importancia considerar la acción conjunta de estos factores a la hora de tomar decisiones en el manejo agronómico (Matteucci, 1998). Un factor importante que incide de manera directa en el rendimiento del cultivo es la fecha en la cual se efectúa la siembra, dado que la variación en el fotoperíodo o longitud del día determina el número de días que transcurren desde la emergencia hasta la floración y la maduración. Por lo tanto, para obtener los mejores rendimientos es necesario conocer la época de siembra más apropiada (Norman, 1983).

Cada sitio tiene un conjunto de condiciones y características que lo definen y lo diferencian de otros sitios por lo tanto, al seleccionar una fecha de siembra estas características deben tenerse en cuenta. Cada genotipo responde de manera diferencial a las condiciones ambientales, lo cual incide en su período de crecimiento y en la posibilidad de alcanzar su madurez fisiológica.

Una fecha óptima de siembra permite el crecimiento y desarrollo de la planta de manera que logra florecer y producir semillas en el estado fisiológico adecuado. Se ha observado en el cultivo de soja, como en otras especies estivales C3, que cuando las plantas florecen anticipadamente están más expuestas a ser afectadas por heladas tempranas. Este hecho ocasiona una disminución del crecimiento el cual incide de manera negativa en los rendimientos. En siembras tardías la planta muestra un acortamiento general de las etapas fenológicas debido a la incidencia de días cortos y altas temperaturas. Como consecuencia las plantas florecen rápidamente con menor desarrollo en altura, disminución del área foliar, adelanto de la maduración, y finalmente se observa una reducción del rendimiento y de sus componentes (Norman, 1983).

El fotoperíodo y la temperatura juegan un papel clave en la determinación del momento de siembra ya que condiciona el comienzo y duración de las diferentes fases fenológicas, y por lo tanto, en la longitud total del ciclo de crecimiento del cultivo. De esta manera, ambos factores, influyen en el rendimiento económico y biológico del mismo (Boote *et al.*, 1994).

El género *Amaranthus* como regla general, requiere para su desarrollo un umbral mínimo de temperatura de 7°C, con un máximo de 47°C y un óptimo de 25°C (Mujica *et al.*, 1997). Crece vegetativamente en días largos y florece cuando los días comienzan a acortarse (U.S. Department of Agriculture, 1979; Nieto, 1986). El crecimiento suele disminuir cuando decrece la intensidad lumínica y baja la temperatura (Kigel, 1996).

La radiación es otro factor que incide en el desarrollo del cultivo dado que es la fuente de energía utilizada por las plantas para el proceso de fotosíntesis, mediante el cual las plantas se desarrollan y crecen (Azcón Bieto y Talón, 2008). Por esta razón, existe una relación directa entre la cantidad de radiación solar recibida durante el período de crecimiento del cultivo y la cosecha obtenida (Hernández y Soto, 2012).

El cultivo de amaranto se vislumbra como una actividad productiva viable y rentable. Sin embargo, no se ha evaluado aún el comportamiento de este cultivo en el sur de nuestro país, como es el caso de la región Norpatagónica del Valle Inferior del Río Negro. El objetivo específico que se planteó en este trabajo fue determinar el período óptimo de siembra y seleccionar cuál de los genotipos ensayados resulta el más adaptado a la zona de estudio.

### **3.2. Materiales y métodos**

Este ensayo se llevó a cabo durante los ciclos productivos 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013. El material genético utilizado fue: *A. cruentus* cv Mexicano, *A. hypochondriacus* cv Dorado, *A. hypochondriacus* cv Antorcha, seleccionados a partir de ensayos preliminares. Las semillas originales fueron provistas por los equipos de investigación de las facultades de agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa (*A. cruentus* cv Mexicano) y la Universidad Nacional de Río Cuarto (*A. hypochondriacus* cv Dorado, *A. hypochondriacus* cv Antorcha).

#### **3.2.1. Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado en este ensayo fue el de parcela dividida con factor principal en bloques, el cual consistió en dividir las parcelas en subparcelas y aplicar un grupo de tratamientos en las parcelas y otro grupo de tratamientos en las subparcelas.

En este ensayo los tratamientos asignados a las parcelas estaban determinados por la fecha de siembra como factor principal a analizar. En las subparcelas los tratamientos estaban definidos por los genotipos seleccionados. Los años fueron considerados como un factor fijo dado que se trata de años consecutivos sobre el mismo material genético, lo cual genera una secuencia de resultados.

La superficie de cada subparcela o subunidad experimental fue de 10,5 m<sup>2</sup> en la cual se sembraron 4 surcos de 5,00 m de largo separados entre sí a 0,70 m. Cada fecha de siembra contó con un número de 3 bloques.

### 3.2.2. Manejo del cultivo

Previo a la siembras se realizaron muestreos de suelo con el objetivo de determinar las características edáficas del sitio experimental para cada uno de los años de ensayo. El suelo presentó textura franco-arcillo-limosa y franca para los años de ensayo, con propiedades químicas dentro de parámetros normales que lo califican de buena aptitud agrícola (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Textura y análisis químico de los suelos utilizados en los ensayos de fechas de siembras y variedades para los diferentes años de estudio.

| Ciclo productivo | Textura               | Profundidad (cm) | pH   | C.E. (mmhos/cm) | MO (%) | Nt (%) | P Olsen mg kg <sup>-1</sup> |
|------------------|-----------------------|------------------|------|-----------------|--------|--------|-----------------------------|
| 2010-2011        | Franco arcillo limoso | 0 - 20           | 8,00 | 0,45            | 3,92   | 0,24   | 13,80                       |
|                  |                       | 20 - 40          | 8,12 | 0,51            | 1,26   | 0,09   | 10,80                       |
| 2011-2012        | Franco                | 0 - 20           | 8,03 | 0,35            | 3,22   | 0,24   | 16,38                       |
|                  |                       | 20 - 40          | 8,70 | 0,41            | 1,30   | 0,12   | 14,02                       |
| 2012-2013        | Franco                | 0 - 20           | 7,86 | 0,40            | 3,41   | 0,22   | 14,52                       |
|                  |                       | 20 - 40          | 8,01 | 0,43            | 1,30   | 0,14   | 13,63                       |

**Fuente:** Análisis textural y determinaciones químicas realizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal (L.A.S.A. y V.) de la Estación Experimental del Valle Inferior del Río Negro. C.E (conductividad eléctrica) y pH, ambos por método potenciométrico, MO: materia orgánica (Walkley y Black), Nt: nitrógeno total (Kjeldhal), P Olsen (fósforo extractable por metodología Olsen, 1954).

El manejo general del cultivo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos (Capítulo 2). Cada uno de los genotipos se sembró en cuatro fechas diferentes, separadas entre sí en aproximadamente 20 días (Tabla 3.2). Cuando las plantas alcanzaron un porte de 50-60 cm de

altura se realizó el raleo necesario para establecer una densidad de plantas de 140.000 pl ha<sup>-1</sup> y el aporque de las mismas.

**Tabla 3.2.** Fechas de siembra para los ciclos productivos de ensayo.

| Ciclo     | 1° Fecha   | 2° Fecha   | 3° Fecha   | 4° Fecha   |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 2010-2011 | 12/11/2010 | 01/12/2010 | 23/12/2010 | 11/01/2011 |
| 2011-2012 | 10/11/2011 | 01/12/2011 | 22/12/2011 | 11/01/2012 |
| 2012-2013 | 14/11/2012 | 30/11/2012 | 21/12/2012 | 11/01/2013 |

Las variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración fueron registradas mediante la estación meteorológica del sitio de estudio (Figuras 2.3 a 2.5 del capítulo 2).

### 3.2.3. Datos recolectados

Durante el desarrollo del ciclo productivo se llevó a cabo el registro de diferentes variables morfofisiológicas: número de hojas visibles a inicio de panojamiento (**HIP**); número máximo de hojas (**MH**); número máximo de nudos (**MN**); número máximo de ramificaciones (**MR**); máxima área foliar (**MAF**); altura a cosecha (**AC**); longitud de panoja (**Lp**); diámetro del tallo (**ΦT**); peso seco de tallo (**PSt**); peso seco de panoja (**PSp**); peso seco de hojas (**PSh**); peso seco de granos por panoja (**PSgp**); peso de mil granos (**P1000**); peso seco de granos por unidad experimental (**PSgue**); densidad de plantas a cosecha (**Dptc**); y porcentaje de plantas enfermas (**%Pe**) según la metodología detallada en el capítulo 2 de Materiales y Métodos.

Una vez obtenidos los valores de las variables detalladas anteriormente se procedió al cálculo de los siguientes indicadores: biomasa aérea de planta (**BApt**); peso seco de la estructura floral (**PSi**); número de granos por panoja (**Ngp**); rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico (**Re**) expresado como kg ha<sup>-1</sup>; densidad de plantas por

hectárea (**Dptc ha<sup>-1</sup>**); biomasa aérea por hectárea o rendimiento biológico (**Rb**) expresado en Kg ha<sup>-1</sup>; e índice de Cosecha (**IC**).

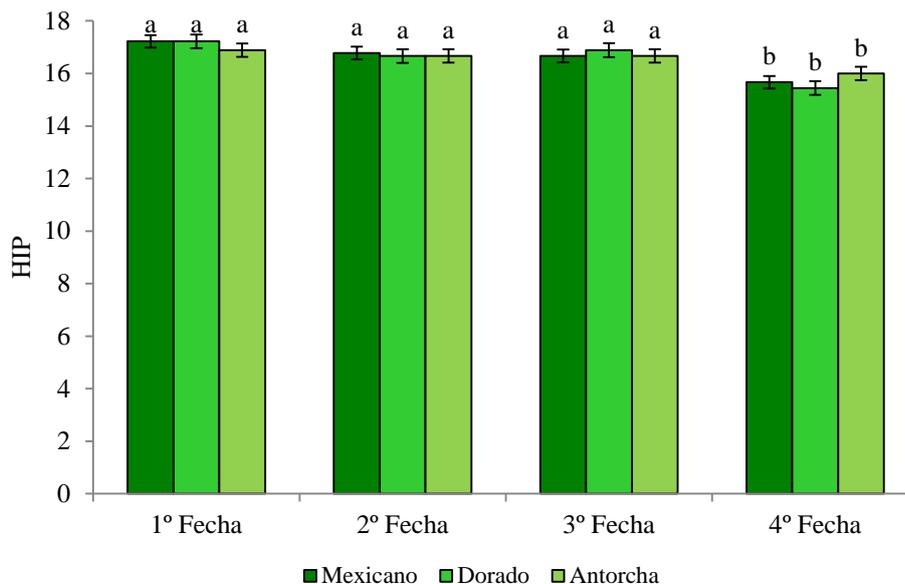
### **3.2.4. Análisis estadístico**

A partir de los datos obtenidos se elaboraron tablas que fueron analizadas a través del programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). El test de ANOVA se aplicó en aquellas variables cuyo comportamiento cumplía los supuestos de normalidad y homocedasticidad (agotando las posibilidades de transformación). El test se aplicó para los datos recolectados de 3 años - 4 fechas de siembra - 3 genotipos, en adelante AxFxG. En la mayoría de las variables (AC, MH, MR,  $\Phi$ T, MAF, %Pe, Re, Rb, Lp, Psgp, Ngp, Dptc, IC) el test de ANOVA detectó interacción con los años, sin embargo, la magnitud de la misma fue despreciable ( $\text{Eta}^2 < 1\%$ ).  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006). Las comparaciones de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años.

## **3.3. Resultados**

### **3.3.1. Variables morfofisiológicas**

Para la variable HIP la magnitud de las diferencias fue despreciable agronómicamente. Por este motivo el análisis estadístico se simplificó considerando el efecto más importante que fue el de las fechas de siembra en promedio ( $\text{Eta}^2 = 36\%$ ) a pesar de haberse detectado una ligera interacción AxF ( $p < 0,0419$ ; F: 2,80). La 4ª fecha de siembra fue menor a las restantes en todos los genotipos. A pesar de ello, la magnitud de las diferencias entre fechas en HIP fue pequeña, entre 15 y 17 hojas (Figura 3.1) lo cual podría considerarse agronómicamente despreciable. No se hallaron diferencias entre genotipos.



**Figura 3.1.** Número de hojas visibles a inicio de panojamiento para las distintas fechas de siembra y genotipos evaluados.

La mayoría de las variables morfofisiológicas evaluadas (AC, MH, MR,  $\Phi$ T, MAF) mostraron interacción altamente significativa ( $p < 0,01$ ) entre los 3 factores (AxFxC). Esta interacción no invalidó los evidentes efectos generados por alguna de las fuentes de variación principales (Tabla 3.3).

En las variables AC, MH,  $\Phi$ T y MAF la mayor fuente de variación estuvo representada por la fecha de siembra con valores de  $\text{Eta}^2 > 40\%$  (Figura 3.2).

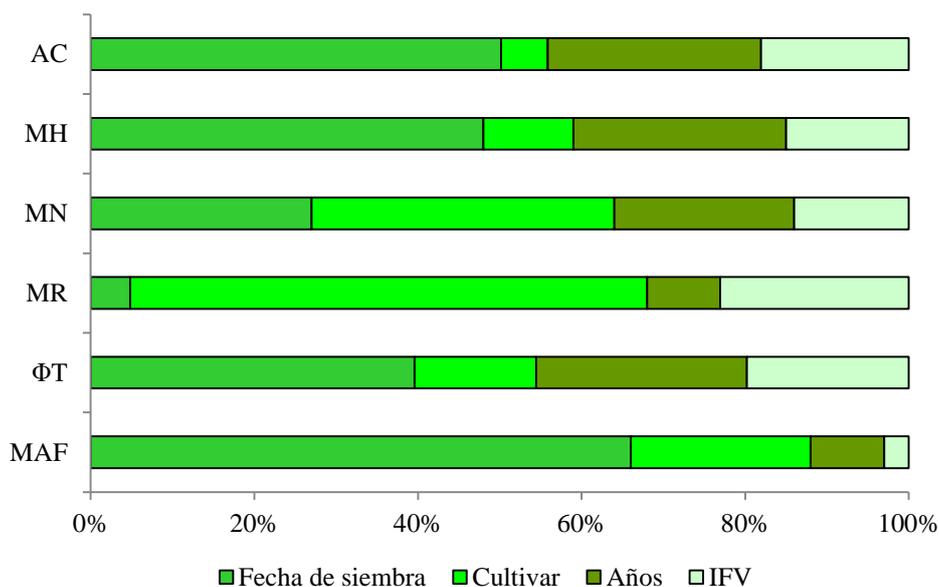
Para la variable AC la mayoría de los genotipos alcanzaron los mayores valores en la 2° y 3° fecha de siembra, excepto Antorcha para el cual no se hallaron diferencias entre la 1°, 2° y 3° fecha de siembra. Coincidentemente en los 3 genotipos la 4° fecha de siembra presentó una evidente reducción de AC. Para la 1°, 2° y 3° fecha de siembra los 3 genotipos lograron alturas próximas a 160 cm mientras que en la 4° fecha variaron entre 120-140 cm. Entre genotipos Mexicano y Antorcha mostraron mayores valores de altura de planta en todas las fechas estudiadas respecto de Dorado.

**Tabla 3.3.** Resultados de la comparación de genotipos para las diferentes variables morfofisiológicas evaluadas según las distintas fechas de siembra estudiadas.

| Variable                  | Cv. | F1        | F2        | F3        | F4        |
|---------------------------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AC<br>(cm)                | Mex | 171,67 b  | 175,56 a  | 176,22 a  | 139,33 e  |
|                           | Dor | 159,56 d  | 167,90 c  | 158,56 d  | 117,55 g  |
|                           | Ant | 171,66 b  | 174,11 ab | 171,44 b  | 126,00 f  |
| MH                        | Mex | 45,33 cd  | 44,11 de  | 42,78 e   | 36,33 g   |
|                           | Dor | 49,22 b   | 49,44 b   | 49,33 b   | 36,56 g   |
|                           | Ant | 51,66 a   | 49,56 b   | 46,67 c   | 40,11 f   |
| MN                        | Mex | 43,33 cd  | 42,89 d   | 43,22 cd  | 39,44 e   |
|                           | Dor | 50,11 a   | 50,22 a   | 48,11 b   | 44,11 c   |
|                           | Ant | 50,56 a   | 49,56 a   | 47,89 b   | 42,89 d   |
| MR                        | Mex | 9,00 hi   | 9,22 h    | 7,67 i    | 10,00 h   |
|                           | Dor | 24,89 c   | 28,55 a   | 26,78 b   | 19,00 f   |
|                           | Ant | 23,44 d   | 24,22 cd  | 20,56 e   | 17,44 g   |
| ΦT<br>(cm)                | Mex | 2,27 e    | 2,26 e    | 2,13 f    | 1,63 h    |
|                           | Dor | 2,63 d    | 2,66 d    | 2,56 d    | 1,65 h    |
|                           | Ant | 3,07 a    | 2,93 b    | 2,80 c    | 1,84 g    |
| MAF<br>(cm <sup>2</sup> ) | Mex | 2857,56 c | 2577,67 d | 2554,11 d | 1956,33 g |
|                           | Dor | 3142,00 b | 2906,67 c | 2859,67 c | 2137,89 f |
|                           | Ant | 3284,67 a | 3141,89 b | 3103,78 b | 2378,56 e |

AC: altura de planta a cosecha; MH: número máximo de hojas; MN: número máximo de nudos; MR: número máximo de ramificaciones; MAF: máxima área foliar; ΦT: diámetro del tallo a cosecha; Cv.: cultivar; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; Dor: cultivar Dorado; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de cada variable (sentido de lectura horizontal y vertical) seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En MH si bien la mayor fuente de variación estuvo representada por la fecha de siembra con un valor de  $E_{ta}^2$  del 48%, los años aportaron una variación no despreciable del 26% (Figura 3.2). En esta variable los mayores valores se lograron en la 1° y 2° fecha de siembra con una evidente reducción de esta variable en la 4° fecha para los 3 genotipos. Antorcha y Dorado en todos los casos lograron mayor MH respecto de Mexicano.



**Figura 3.2.** Fuentes de variación principales para las variables morfofisiológicas estudiadas. AP: Altura de planta (cm); MH: número máximo de hojas; MN: número máximo de nudos; MR: número máximo de ramificaciones; MAF: área foliar máxima (cm<sup>2</sup>); ΦT: diámetro del tallo a cosecha (cm). IFV: interacción entre fuentes de variación.

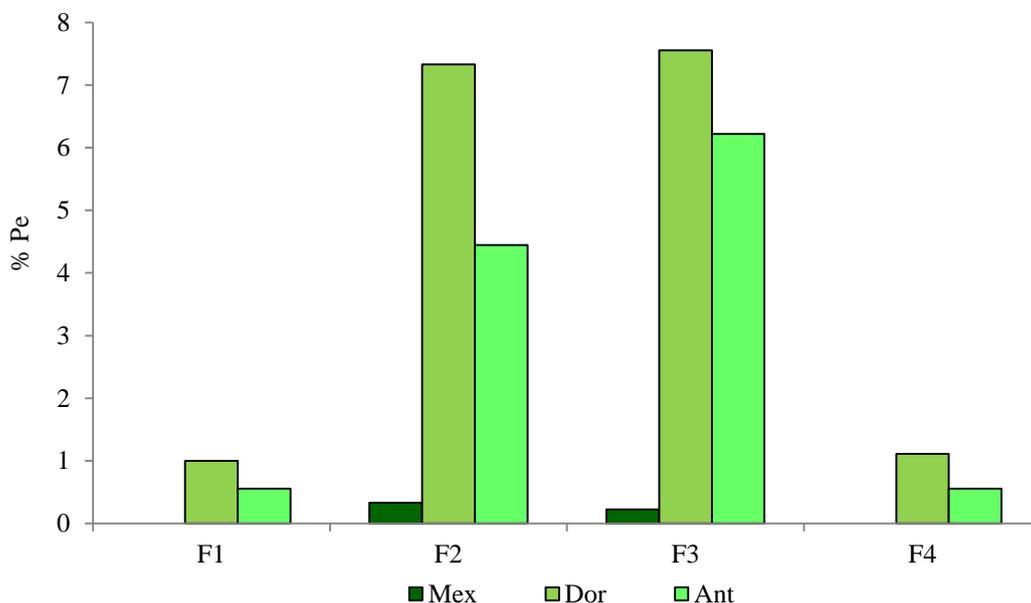
En cuanto a ΦT se observó que la 1° y la 2° fecha de siembra permitió alcanzar los mayores valores de esta variable mientras que en la 4° fecha se apreció una evidente reducción de la misma en los 3 genotipos evaluados. Antorcha superó a los restantes genotipos en todas las fechas evaluadas mientras que el cultivar Mexicano mostró el comportamiento inverso.

En MAF la 1° fecha mostró los mayores valores de esta variable, reduciéndose en las sucesivas fechas de siembra para los 3 genotipos. Antorcha logró los mayores valores de MAF en todas las fechas estudiadas contrariamente a lo observado en Mexicano.

En cuanto a las variables MN y MR la mayor fuente de variación estuvo representada por el genotipo con valores de  $Eta^2$  de 37% y 63% respectivamente. En MN se apreció un evidente efecto de las fechas de siembra con valores de  $Eta^2$  de 27% y de los años de 23% (Figura 3.2). MN no presentó diferencias estadísticas entre 1° y 2° fecha de siembra aunque se observó una evidente disminución de esta variable en la 4° fecha para los 3 genotipos. Antorcha y Dorado prácticamente no presentaron diferencias entre sí en las distintas fechas estudiadas y en todos los casos superaron a Mexicano. En relación a MR todos los genotipos alcanzaron los mayores valores en la 2° fecha de siembra. Los genotipos Antorcha y Dorado en todos los casos logaron mayores valores de esta variable respecto de Mexicano; y en todos los casos Dorado fue el cual presentó los mayores valores de MR. Para la 4° fecha de siembra se apreció una disminución del número de ramificaciones en los 3 genotipos.

En relación al %Pe el análisis de ANOVA detectó interacción triple  $A \times F \times G$  ( $p < 0,0001$ ;  $F=6,13$ ). Sin embargo, esta interacción no invalidó el evidente efecto generado por las fechas de siembra y los genotipos cuyos  $Eta^2$  alcanzaron valores de 30% y 24% respectivamente.

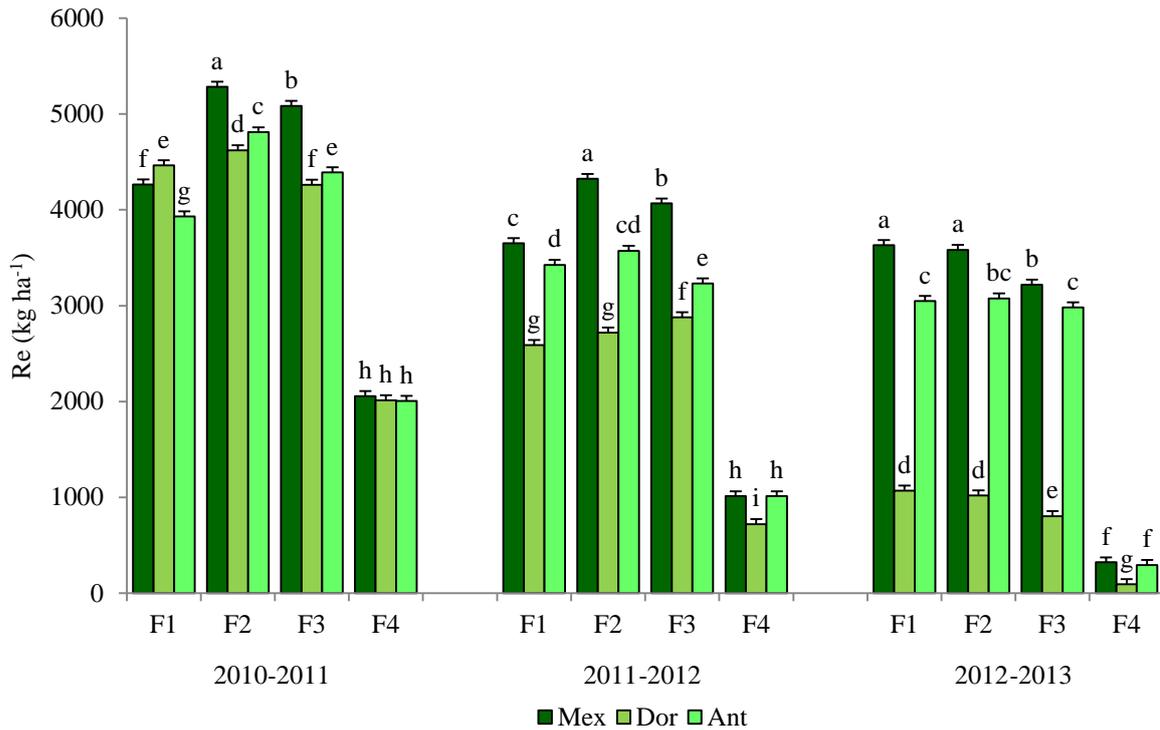
La 2° y 3° fecha de siembra fueron las más afectadas por la enfermedad en los 3 genotipos. A pesar de ello, se evidenció que Dorado y Antorcha fueron más susceptibles al ataque de *Macrophoma sp* dado que los mismos presentaron mayor porcentaje de incidencia en todas las fechas respecto de Mexicano (Figura 3.3).



**Figura 3.3.** Incidencia promedio de “mancha del tallo” según fechas de siembra y genotipos para los ciclos de ensayo evaluados. %Pe: porcentaje de plantas enfermas; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; Dor: cultivar Dorado; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra.

### 3.3.2. Rendimiento en grano o Rendimiento Económico (Re)

A partir de los datos recolectados se realizó el análisis de ANOVA para la variable rendimiento para los 3 años - 4 fechas de siembra - 3 genotipos (Anexo), en adelante AxFxG. Mediante el mismo se detectó una interacción triple AxFxG ( $F=40,7$ ;  $p<0,0001$ ), lo que indica que el comportamiento de los genotipos no es el mismo entre fechas, ni para cada año evaluado (Figura 3.4). A pesar de ello, la evidente diferencia de la 4° fecha de siembra respecto de las restantes genera un efecto lo suficientemente fuerte como para no ser invalidado por esta interacción.



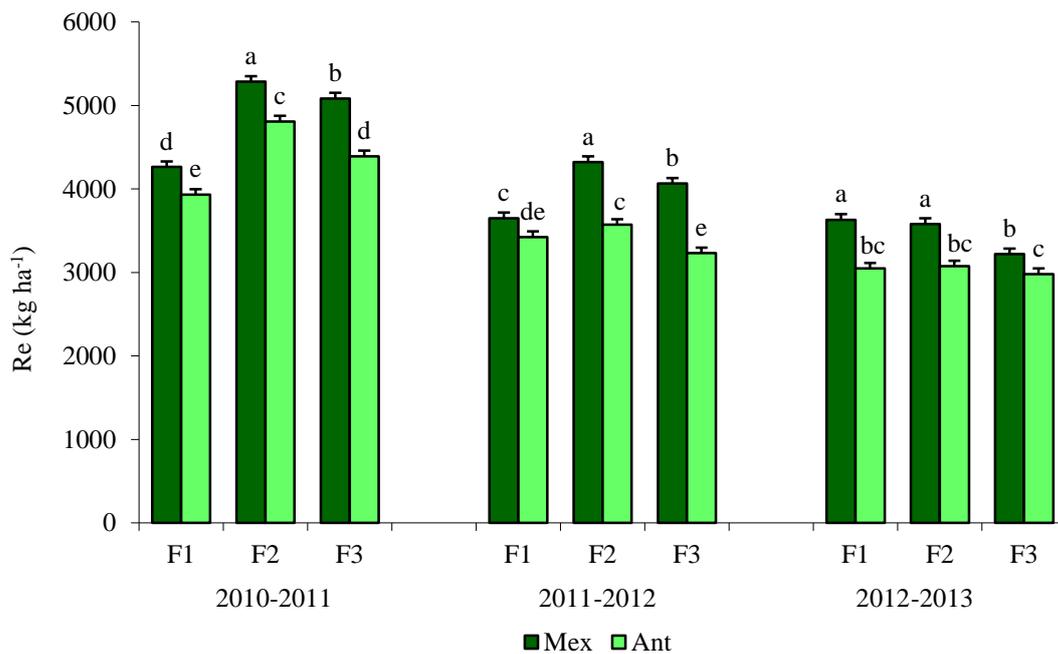
**Figura 3.4.** Rendimiento en grano de los genotipos evaluados para las cuatro fechas de siembra en los tres años de ensayo. Re: rendimiento económico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; Dor: cultivar Dorado; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores seguidos de la misma letra dentro del mismo año, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

Fue posible observar que en la 4° fecha de siembra los rendimientos se redujeron sistemáticamente en todos los genotipos. Este mismo comportamiento se manifestó en los diferentes años de experimentación (Figura 3.4). Un contraste entre esta fecha y el promedio de las restantes mostró que la misma representa el 50% de toda la variación del análisis (Anexo).

Por otra parte, en el año 2011 se lograron los mayores rendimientos medios en todas las fechas y genotipos. Así mismo, se observó una tendencia a reducirse esta variable en los diferentes genotipos en los sucesivos años de ensayo. Efecto más marcado en el cultivar Dorado. Un contraste entre este genotipo y el promedio de los restantes muestra como el mismo representa el 12% de toda la variación del análisis (Anexo).

Debido a los evidentes efectos observados en el rendimiento, relacionados a la 4° fecha respecto de las restantes, así como a la marcada reducción de Dorado respecto de los demás genotipos se optó por continuar el análisis de varianza de manera restringida a 3 años - 3 fechas de siembra - 2 genotipos, en adelante AxFxG\*, para evitar que los cuadrados medios de error (CMe) se vean subestimados por considerar tratamientos con efectos medios bajos.

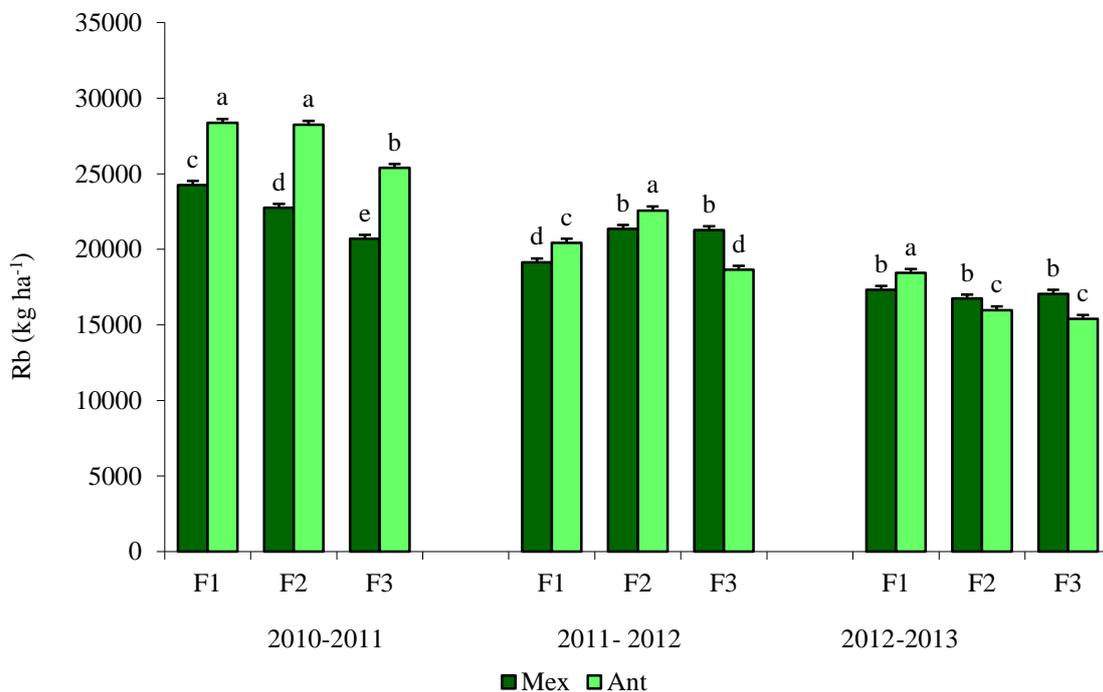
El análisis realizado para la restricción mencionada mostró interacción de segundo orden ( $F=7,62$ ;  $p=0,0009$ ) entre AxFxG\* lo que indica que el comportamiento de los genotipos no es el mismo en cada una de las fechas ni en todos los años evaluados. Sin embargo, la interacción no invalidó la superioridad en rendimientos del genotipo Mexicano sobre Antorcha en todas las fechas de siembra (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Rendimiento en grano de los genotipos evaluados para tres fechas de siembra en los tres años ensayados. Re: rendimiento económico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.3. Biomasa aérea o Rendimiento Biológico (Rb)

El análisis de ANOVA realizado para esta variable detectó interacción de segundo orden ( $A \times F \times G^*$ ) ( $F=13,51$ ;  $p<0,01$ ), lo que implica que el comportamiento de ambos genotipos no es el mismo en cada fecha en todos los años de ensayo. A pesar de ello, se observó que la interacción no invalidó la superioridad en producción de biomasa de Antorcha respecto de Mexicano en casi todas las fechas y años estudiados (Figura 3.6).

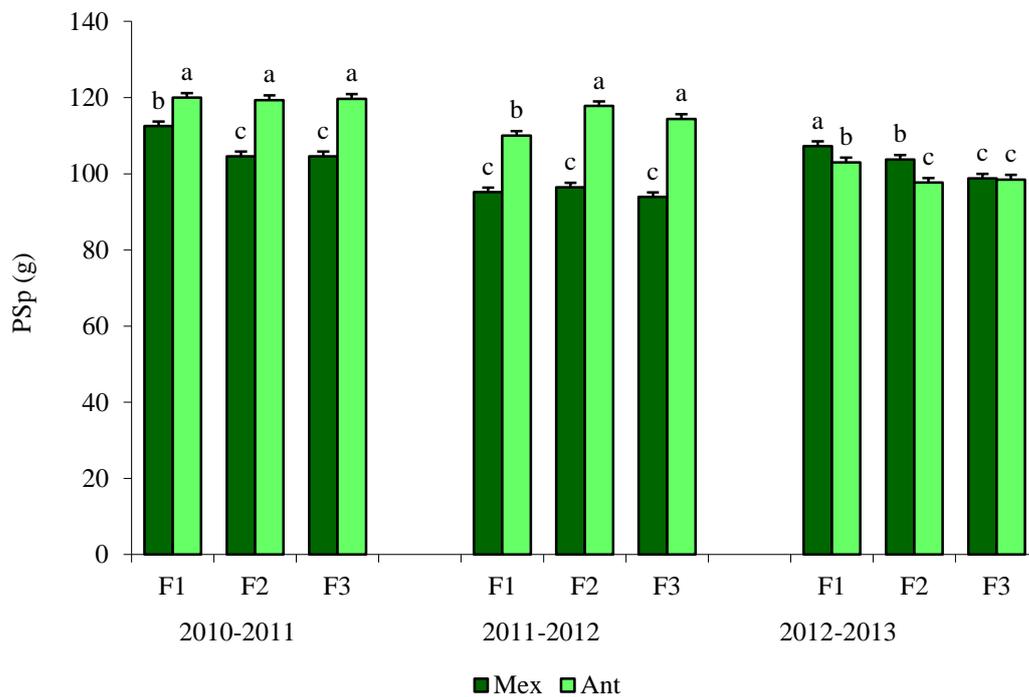


**Figura 3.6.** Biomasa aérea por hectárea para los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años ensayados. Rb: rendimiento biológico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

Los mayores rendimientos en biomasa se lograron en el ciclo 2010-2011 para ambos genotipos. Esta variable tendió a reducirse en los sucesivos años de ensayo observándose una disminución de la magnitud de las diferencias entre ambos genotipos.

### 3.3.4. Peso seco de panoja (P<sub>Sp</sub>)

A partir del análisis de ANOVA para esta variable se detectó interacción de primer orden entre FxG ( $F=8,91$ ;  $p=0,0020$ ), AxG ( $F=136,43$ ;  $p<0,0001$ ) AxG ( $F=10,43$ ;  $p=0,0004$ ). A su vez se obtuvieron diferencias significativas entre genotipos ( $F= 263,48$ ;  $p<0,0001$ ), entre fechas ( $F= 10,43$ , y  $p=0,0024$ ) y entre años ( $F=110,61$ ;  $p=0,0000$ ). En el ciclo 2010-2011 ambos genotipos lograron los mayores valores de P<sub>Sp</sub> (Figura 3.7).



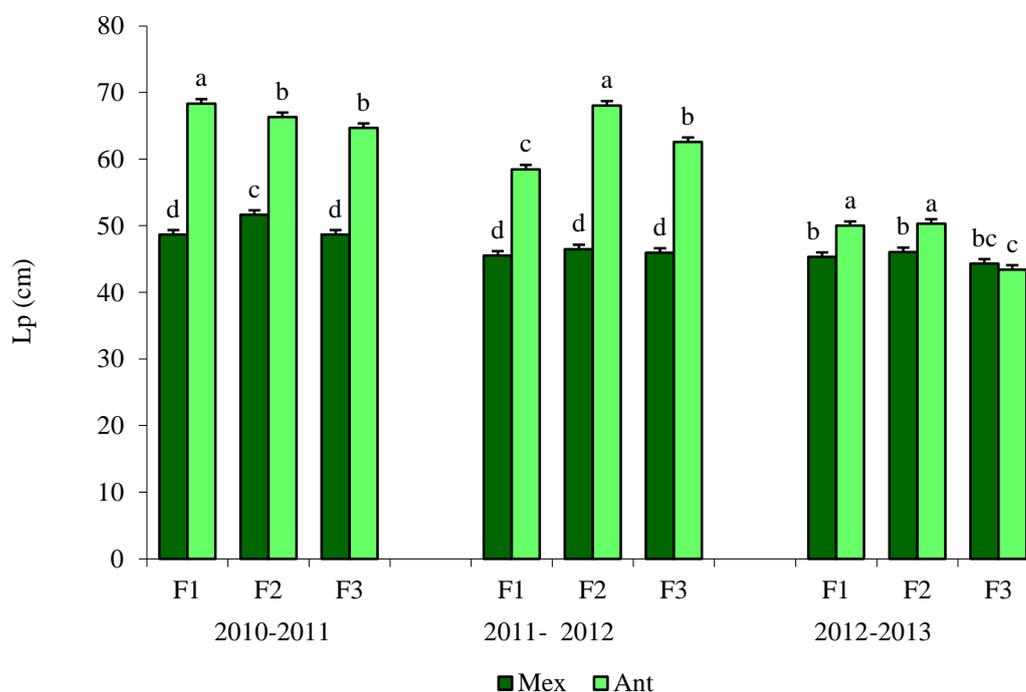
**Figura 3.7.** Comportamiento de la variable peso seco de panoja en los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años ensayados. P<sub>Sp</sub>: peso seco de panoja (g); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En promedio Antorcha superó a Mexicano en P<sub>Sp</sub> en todas las fechas de los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012. En el 2012-2013 el comportamiento fue el contrario, ya que Mexicano fue levemente superior a Antorcha en la mayoría de las fechas de siembra. Por otra parte no fue posible determinar un comportamiento sistemático de esta variable en las

distintas fechas, de modo tal que no es posible establecer una fecha de siembra óptima para lograr los mayores valores de PSgp.

### 3.3.5. Longitud de panoja (Lp)

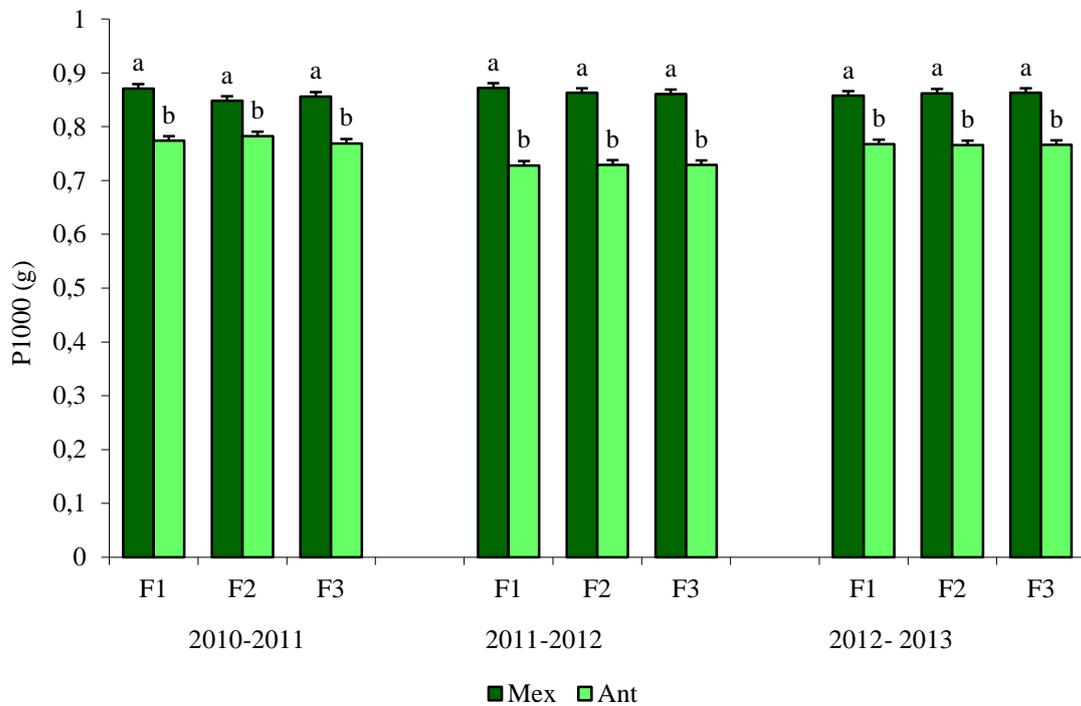
El análisis de ANOVA realizado para la variable detectó interacción de segundo orden entre años, fechas y genotipos ( $A \times F \times G$ ) ( $F=15,99$ ;  $p<0,01$ ) lo que implica que el comportamiento de ambos genotipos no fue el mismo en cada fecha en todos los años de ensayo. Sin embargo, la interacción no invalidó la superioridad de Antorcha en longitud de panoja respecto de Mexicano en casi todas las fechas y años estudiados. Se observó una reducción de Lp para el cultivar Antorcha en los sucesivos años de ensayo, mientras que Mexicano prácticamente no mostró variaciones de longitud asociadas a los años o a las fechas de siembra (Figura 3.8).



**Figura 3.8.** Comportamiento de la variable longitud de panoja en los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo. Lp: longitud de panoja (cm); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.6. Peso de mil granos (P1000)

En análisis de ANOVA realizado detectó interacción simple entre AxG ( $F=16,82$ ;  $p<0,01$ ) y diferencias entre genotipos ( $F=700,1$ ;  $p<0,01$ ). La interacción AxG no invalidó las diferencias entre genotipos. El cultivar Mexicano superó a Antorcha en todas las fechas de siembra y en todos los años evaluados (Figura 3.9). Es importante destacar que los genotipos presentaron todos los años valores promedio de P1000 de 0,87 y 0,72 para Mexicano para Antorcha respectivamente.



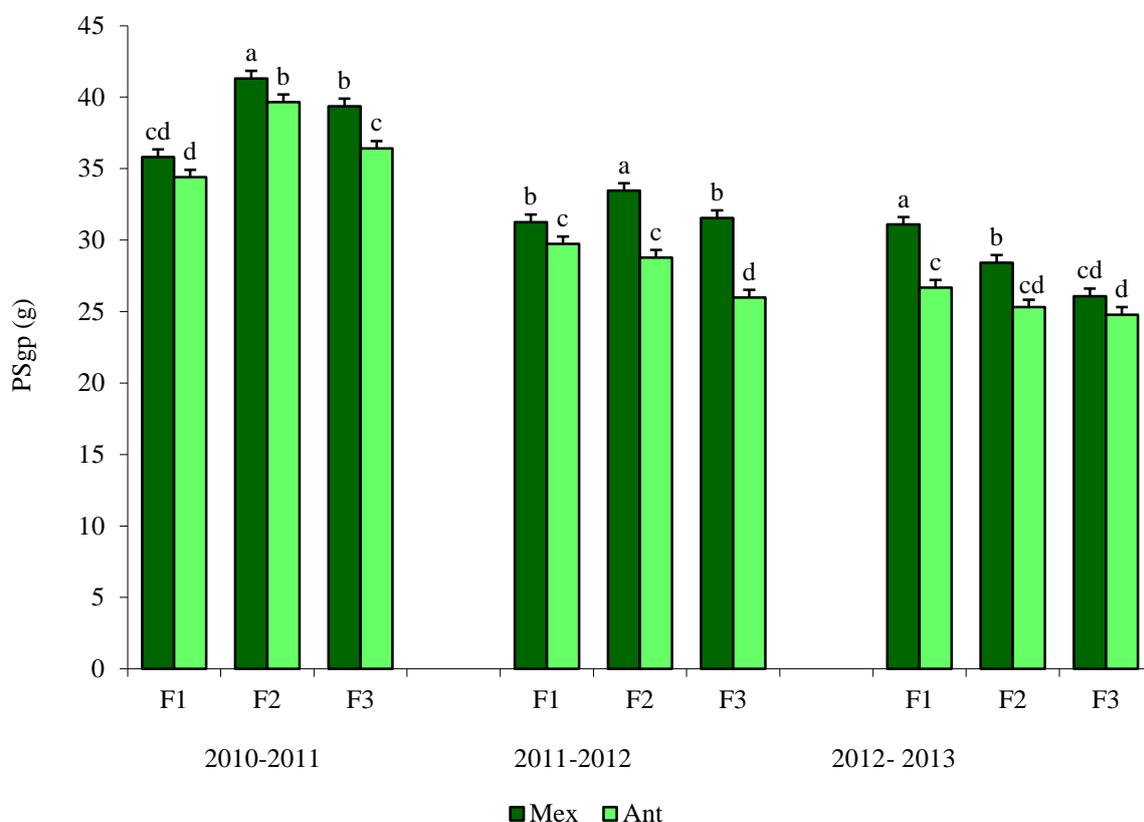
**Figura 3.9.** Comportamiento de la variable P1000 de los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo. P1000: peso de mil granos (g); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.7. Peso seco de granos por panoja (PSgp)

El análisis de ANOVA realizado para la variable detectó interacción de segundo orden entre años, fechas y genotipos ( $Ax Fx G$ ) ( $F=6,28$ ;  $p<0,01$ ) lo que implica que el

comportamiento de ambos genotipos no fue el mismo en cada fecha en todos los años de ensayo. En el año 2011 se lograron los mayores valores de PSgp en ambos genotipos. Los valores de PSgp del cultivar Mexicano fueron sistemáticamente superiores a los de Antorcha en casi todas las fechas y años estudiados.

La variable PSgp para ambos genotipos a su vez mostró una tendencia a reducirse en los sucesivos años de ensayo (Figura 3.10).



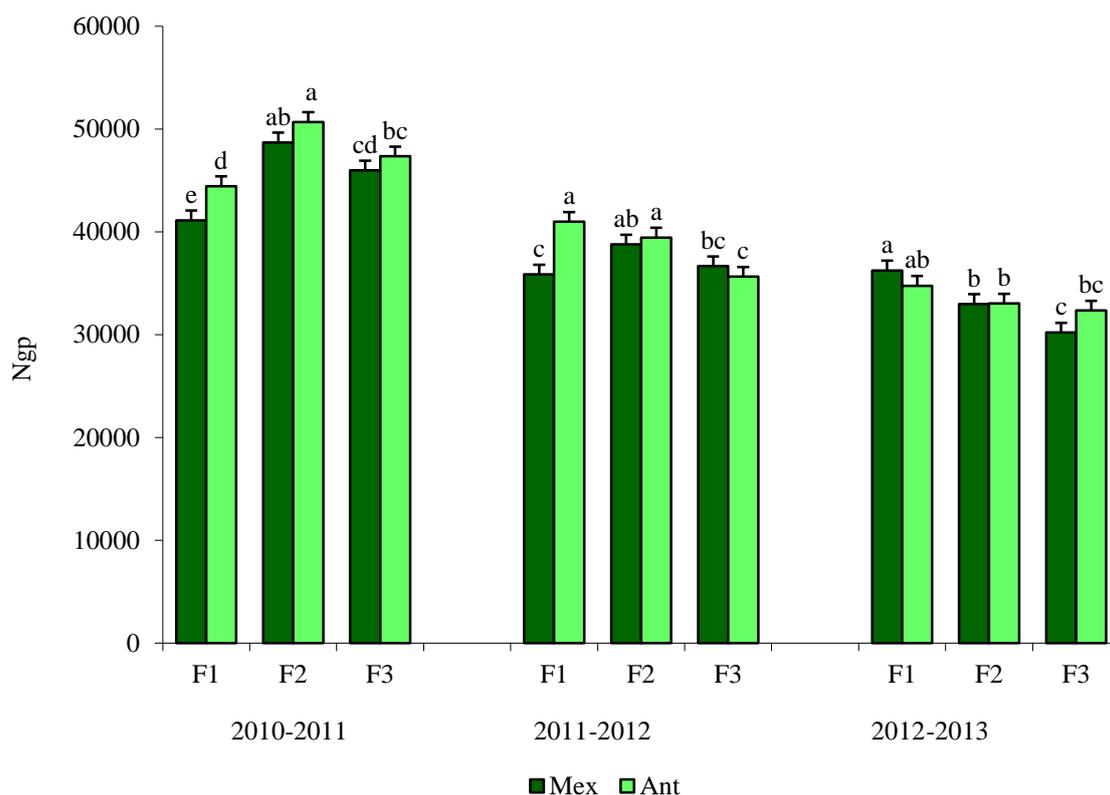
**Figura 3.10.** Comportamiento de la variable Peso seco de granos panoja en los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo. PSgp: peso seco de granos por panoja (g); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.8. Número de granos por panoja (Ngp)

El análisis de ANOVA para la variable detectó interacción triple AxFxG ( $F= 3,44$   $p<0,05$ ), lo que implica que el comportamiento de los genotipos no fue el mismo entre fechas ni años de estudio.

Los mayores valores de Ngp se obtuvieron en el ciclo 2010-2011 para ambos genotipos y en todas las fechas estudiadas, observándose una reducción de esta variable en los sucesivos años de ensayo que disminuye las diferencias entre genotipos (Figura 3.11).

Por otra parte Ngp mostró un comportamiento variable entre fechas y años, lo cual no permitió establecer la fecha óptima de siembra para ninguno de los dos genotipos.

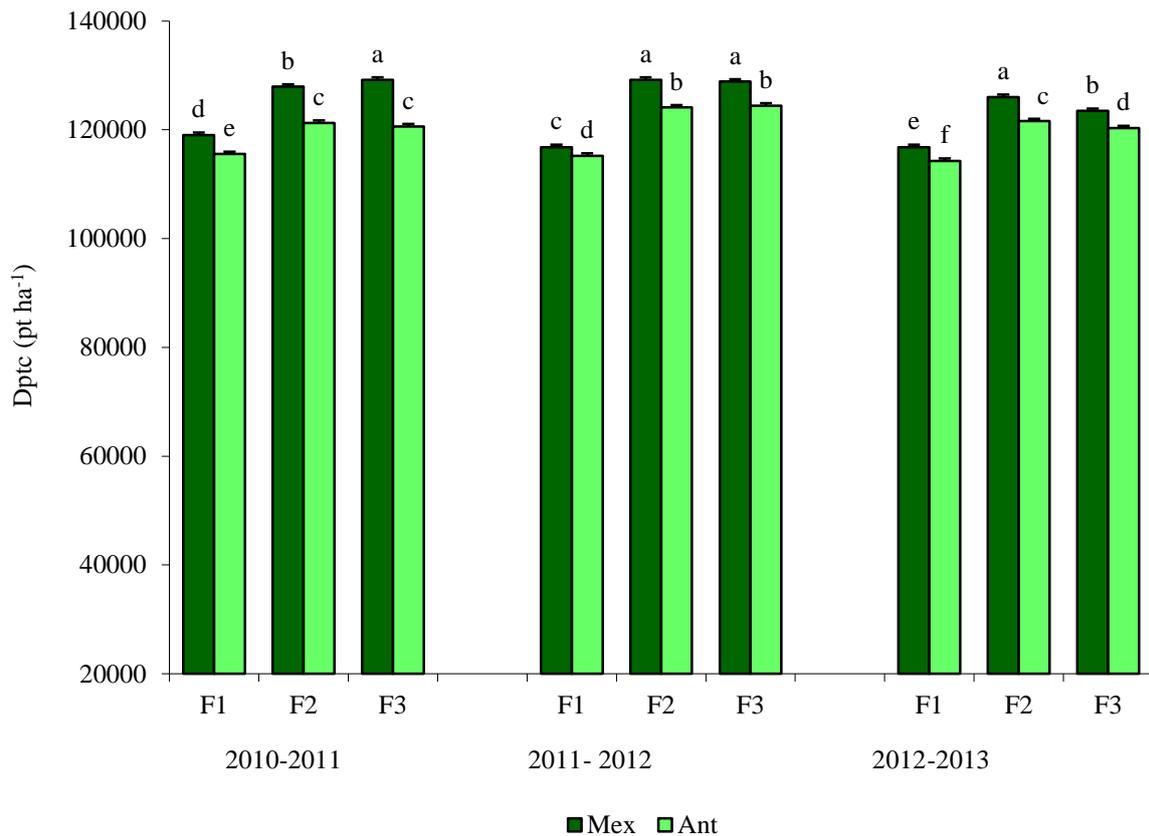


**Figura 3.11.** Comportamiento de la variable número de granos por panoja en los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en tres años de ensayo. Ngp: número de granos por panoja; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.9. Densidad de plantas a cosecha (Dptc)

El análisis de ANOVA realizado para la variable detectó interacción triple (AxFxG) ( $F=3,71$ ;  $p<0,05$ ), lo que implica que el comportamiento de ambos genotipos no fue el mismo en cada fecha en todos los años de ensayo. Sin embargo, la interacción no invalidó la superioridad del cultivar Mexicano en número de plantas por hectárea respecto de Antorcha en todas las fechas y años estudiados (Figura 3.12).

En ambos genotipos se observó que el número de plantas a cosecha fue menor en la primera fecha de siembra respecto de las restantes. Este comportamiento se mantuvo en los sucesivos años de ensayo.

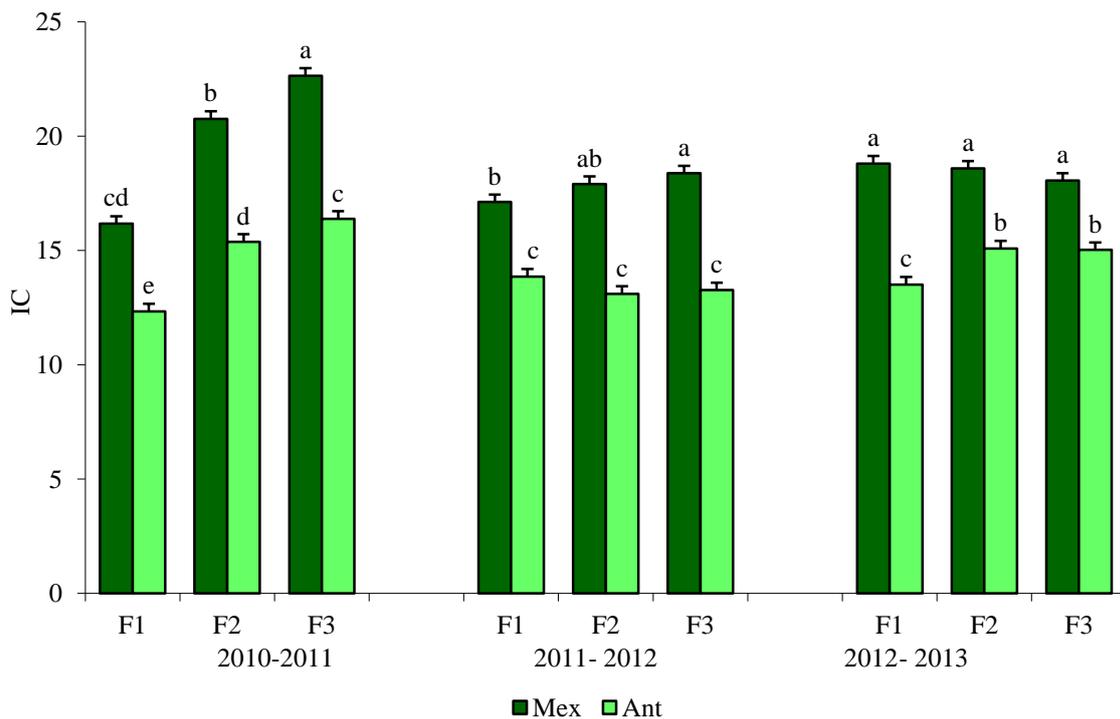


**Figura 3.12.** Comportamiento de la densidad de plantas a cosecha para los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años de ensayo. Dptc: densidad de plantas a cosecha (pt ha<sup>-1</sup>); Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

### 3.3.10. Índice de cosecha (IC).

El análisis estadístico realizado para la variable detectó interacción de segundo orden  $A \times F \times G$  ( $F= 8,27$ ;  $p < 0,01$ ) lo que implica que el comportamiento de los genotipos no fue el mismo en cada fecha de siembra ni en cada uno de los años estudiados. Sin embargo, la interacción no invalidó la superioridad en IC por parte de Mexicano respecto de Antorcha en las fechas y años estudiados.

Respecto de las fechas de siembra Antorcha mostró un comportamiento similar en todos los ciclos de cultivo, mientras que Mexicano presentó variabilidad en el ciclo 2010-2011, y luego un comportamiento estable en los siguientes ciclos (Figura 3.13).



**Figura 3.13.** Comportamiento del índice de cosecha en los genotipos evaluados para las tres fechas de siembra en los tres años de ensayo. IC: índice de cosecha; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de un mismo año seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ )

### 3.4. Discusión

En relación a la variable HIP se observó un comportamiento homogéneo respecto de las fechas y genotipos, todos ellos iniciaron el panojamiento cuando las plantas presentaron entre 15 y 17 hojas visibles. Esta característica podría estar relacionada al fenotipo de estos genotipos en la zona ya que no parecería ser afectado por la fecha de siembra seleccionada.

En lo que respecta a las variables morfofisiológicas se observaron diferencias entre fechas de siembra y entre genotipos para la mayoría de ellas. En AC al igual que en las restantes variables, los resultados de los ensayos de esta tesis mostraron que la 4° fecha de siembra presentó una reducción de las mismas en todos los genotipos, posiblemente debido a la variación de las condiciones ambientales dado que las temperaturas y el fotoperíodo comenzaron a disminuir a partir de esta fecha de siembra dando lugar a una fase de crecimiento vegetativo cronológicamente más corta relación a las otras fechas ensayadas.

En concordancia con estos resultados, un trabajo realizado en La Pampa Argentina con 3 especies de amaranto en 4 fechas de siembra en 3 ciclos de cultivo mostró AC promedios entre 102 - 162 cm, en el cual las plantas con menor porte correspondían a la 4° fecha de siembra (Troiani *et al.*, 2004). Un ensayo similar con 5 fechas de siembra realizado en Irán encontró una reducción de AC a medida que se retrasaron las fechas de siembra (Yarnia *et al.*, 2010). Estos autores atribuyeron la reducción de esta variable al acortamiento de la longitud del día que ocurre al aproximarse el fin del verano.

En cuanto a  $\Phi T$  podríamos suponer un efecto de Dptc dado que Mexicano presentó en todos los casos mayores densidades que Antorcha. Ello podría explicar los menores valores de  $\Phi T$ , dado que, altas densidades generan mayor competencia intraespecífica y como resultado se obtienen plantas de menor porte con tallos delgados (Hass, 1983; Guillen Portal *et al.*, 1999, Cassini y La Rocca, 2014). Ambos genotipos mostraron valores de AC similares,

sin embargo, Mexicano presentó menor número de nudos, lo que indicaría que sus entrenudos fueron más largos.

El  $\Phi T$  es considerado una característica importante para la cosecha mecánica donde, tallos más delgados como los de Mexicano, favorecerían esta actividad. Sin embargo, tallos de mayor diámetro como los de Antorcha o Dorado reducirían el vuelco de plantas en zonas de vientos como las del Valle Inferior del Río Negro. Este efecto no se observó en los ensayos realizados, posiblemente debido a la tarea de aporque realizada al momento del raleo de plantas.

Tanto MN como  $\Phi T$  fueron variables afectadas en la 4ª fecha de siembra, ambas variables se redujeron en los 3 genotipos posiblemente debido al efecto del ambiente antes mencionado.

En MH y MR los genotipos Antorcha y Dorado presentaron mayores valores respecto de Mexicano. Este hecho podría explicar los mayores valores de MAF de estos genotipos. Los valores de MH para Antorcha y Dorado si bien presentaron diferencias estadísticas entre sí, las mismas podrían ser consideradas de poca relevancia agronómica dado que, no superaron las 3 hojas como máxima diferencia entre sí. En MR Dorado mostró, en todos los casos, mayor número de ramificaciones respecto de Antorcha. Pese a estas diferencias MAF fue mayor en Antorcha, lo que permite suponer un escaso aporte del área foliar por parte de las ramificaciones, o bien que Antorcha presenta en general hojas de mayor tamaño.

Siembras tempranas de amaranto permiten obtener mayores valores de área foliar con una duración más prolongada de la misma hecho que se asocia a una mayor producción de fotosintatos los cuales permiten incrementar el número de semillas por unidad de área sin reducir el peso de las mismas, con un consecuente aumento del rendimiento (Barros *et al.*, 2004 citado por Yarnia *et al.*, 2010).

En cuanto a la incidencia de enfermedad (*Macrophoma sp*), siembras tempranas y tardías presentaron menor %Pe en todos los genotipos. Dorado y Antorcha fueron los de mayor susceptibilidad mientras que Mexicano presentó un comportamiento opuesto en todas las fechas estudiadas. Aunque los porcentajes de incidencia de esta enfermedad son en general bajos (<10%), el comportamiento del cultivar Mexicano debería considerarse ante la posibilidad de siembras en sitios donde se ha manifestado la enfermedad o de condiciones propensas a la misma.

En todos los genotipos ensayados las tres primeras fechas de siembra evaluadas permitieron cumplir el ciclo fenológico del cultivo en su total potencialidad. Las plantas de estas fechas presentaron (respecto de la 4ª fecha) una altura normal, panojas bien desarrolladas, abundante área foliar y mayor número de granos. Este comportamiento podría estar asociado a las condiciones ambientales, las cuales permitieron un adecuado desarrollo de la planta a través de sus diferentes estadios fenológicos. Por el contrario, en la 4ª fecha de siembra, el ciclo de desarrollo de las plantas se vio reducido, posiblemente en respuesta a factores tales como radiación, fotoperíodo y temperatura, los cuales disminuyeron luego de la estación estival. En estas condiciones la planta acortó sus etapas fenológicas para lograr completar su ciclo de vida, para ello, indujo tempranamente la floración con un menor desarrollo de la planta y menor número de granos a cosecha, lo que condujo a la reducción de los rendimientos económicos (Re) y biológicos (Rb). El comportamiento antes descrito se observó sistemáticamente en todos los años y genotipos, lo que podría atribuirse a la incidencia de temperaturas inferiores a la temperatura base de 8°C durante finales de la estación estival y a la respuesta fotosensible que presenta este cultivo durante el desarrollo del mismo (NRC, 1984; Pedroza, 1989). En este sentido, el amaranto requiere para su completo desarrollo al menos de 120 días con temperaturas superiores a 12°C. Cuando las

temperaturas se aproximan a los 8°C detiene su crecimiento y por debajo de 4°C sufre daños por enfriamiento (NRC, 1984; Pedroza, 1989).

En general todas las especies del género *Amarathus* prosperan adecuadamente en ambientes con alta luminosidad (NRC, 1984; Pedroza, 1989). Sin embargo, algunos autores evidencian la sensibilidad que muchos ejemplares del género *Amarathus* presentan ante diferencias en la longitud del día, los cuales pueden florecer y producir semillas en menos de 3 meses si son cultivados en fotoperíodos cortos (menores a 12 hs). Esta condición reduce la altura de plantas y el número de individuos (Duncan, 1980; NRC, 1984; Wu Huaixiang *et al.*, 2002; Witehead *et al.*, 2002). El acortamiento de los días luego del período de verano suele manifestarse con efectos importantes en el desarrollo de las plantas de amaranto (Kigel, 1994).

En relación con lo antes mencionado, Khandaker *et al.* (2009) hace referencia a la temperatura de las estaciones como un factor que puede tener efectos sobre el rendimiento del cultivo, principalmente por su incidencia en los procesos de desarrollo fenológico. Variaciones en la temperatura del aire y en la luz solar pueden limitar el crecimiento de plantas tanto en regímenes bajos como altos. Las condiciones ambientales entre estos dos extremos proporcionan un rango de temperatura de aire óptima para el crecimiento vegetal que permite la máxima productividad. En sus ensayos de siembras de *Amaranthus Tricolor* L, de uso principalmente hortícola, cuando el cultivo estuvo expuesto a temperaturas más bajas y a menor intensidad de la luz solar (18 °C y 850  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{S}^{-1}$ ) que las óptimas (28 - 29°C y 1240 - 1257  $\mu\text{mol.m}^{-2} \text{S}^{-1}$ ) observó menor desarrollo de plantas y reducción de los valores de rendimiento. Bajo condiciones climáticas más cálidas (temperatura e intensidad lumínica cercanas a la óptima) se lograron mayores alturas de planta, número de hojas, peso fresco y seco, con aumento en la coloración de la hoja y la acumulación de betacianina (Khandaker *et al.*, 2009). Un ensayo de similares características al descrito en este experimento, llevado a

cabo en La pampa, Argentina, con diferentes especies de amaranto, en 4 fechas de siembra entre noviembre y enero obtuvo como resultado, en la fecha más tardía, plantas de menor altura, reducción de la biomasa y del rendimiento en grano, y mayor pérdida de plantas. Esta respuesta del cultivo Troiani *et al.*, (2004) la atribuye a la reducción del período de días disponible para que las plantas puedan completar su ciclo fenológico, sumado a los menores niveles de luz y bajas temperaturas durante el llenado y la maduración de los granos. En concordancia con este trabajo, otras investigaciones realizadas en la Región Pampeana, recomiendan siembras desde fines de octubre a principios de noviembre debido a que las siembras durante el mes de enero limitan el desarrollo fenológico del cultivo (Vargas López *et al.*, 1993; Agamennoni, 1995).

Por otra parte, un ensayo con 10 variedades de amaranto sembrados a principios de enero bajo condiciones de secano en el INTA Anguil, hallaron resultados diferentes a los encontrados en el ensayo descrito en esta tesis. Este equipo de trabajo encontró que aquellos genotipos de ciclo largo sembrados en una fecha tardía podían alcanzar rendimientos superiores o similares a siembras tempranas (Vargas López *et al.*, 2006).

Los rendimientos económicos obtenidos en los ensayos de esta tesis fueron en promedio 3.341, 3.667, 3.435 y 1.058 kg ha<sup>-1</sup> para cada fecha de siembra respectivamente. Estos valores permiten suponer que la región de estudio es altamente favorable para la producción de este cultivo debido a las condiciones ambientales así como al recurso hídrico de calidad disponible. Al comparar estos resultados con los rendimientos alcanzados en ensayos de similares fechas de siembra en condiciones de secano, los cuales fueron de 1.012, 992, 966 y 802 kg ha<sup>-1</sup> (Troiani *et al.*, 2004), se observa que los rendimientos logrados en esta tesis fueron en promedio notoriamente mayores.

Los rendimientos económicos obtenidos están relacionados con la radiación solar efectiva del sitio de estudio la cual alcanza sus mayores valores en la estación primavero-estival (en

promedio  $500 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ) para reducirse luego conforme se aproxima la estación otoño-invernal (en promedio a  $242 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ ) (Martin, 2009).

La fecha de siembra incidió en el crecimiento y desarrollo del cultivo dada la existencia de diferentes condiciones de radiación, temperatura y fotoperíodo. Las fechas que alcanzaron mayores rendimientos biológicos permitieron rendimientos económicos más elevados. Esto posiblemente esté relacionado con la tasa de crecimiento del cultivo la cual es altamente dependiente de la radiación que el follaje puede interceptar y de la eficiencia de conversión de esta en materia seca, la que a su vez depende de los recursos disponibles y del genotipo.

La 4ª fecha de siembra se desarrolló en condiciones de radiación, fotoperíodo y temperatura, en promedio, menores a las otras fechas evaluadas, hecho que incidió en las variables morfofisiológicas (AC, MH, MN, MR, MAF) que determinan la biomasa producida (Rb) y en consecuencia, los rendimientos económicos (Re) obtenidos.

En maíz, Díaz *et al.* (2010) menciona que la producción de materia seca total es el resultado de la eficiencia del follaje del cultivo en la intercepción y utilización de la radiación solar disponible durante el ciclo de crecimiento. Sin embargo, esta eficiencia puede ser influenciada por la cantidad de radiación solar, la habilidad de las hojas para fotosintetizar, el IAF, la arquitectura de la planta, y la respiración entre otros. Es decir, factores internos de crecimiento relacionados con el genotipo, y factores externos relacionados con el ambiente y las prácticas de manejo utilizadas durante el cultivo. Resultados similares fueron hallados en sorgo y maíz por Hernández Cordova y Soto Carreno (2013).

En cuanto a las fechas de siembra evaluadas, podría considerarse más apropiada para la siembra de amaranto en esta región principios de diciembre (2ª fecha propuesta en estos ensayos) debido a que la misma permitió obtener, en la mayoría de los casos, los rendimientos más elevados en todos los genotipos y años de estudio.

Los rendimientos alcanzados en la última fecha de siembra de esta tesis fueron significativamente menores a los obtenidos en trabajos realizados con genotipos de ciclo largo en Anguil, sembrados en una fecha tardía en condiciones de secano, los cuales alcanzaron rendimientos que variaron entre 940 y 1.980 kg ha<sup>-1</sup> (Vargas López *et al.*, 2006). En el mismo sentido, Agamenoni en Hilario Ascasubi trabajó con tres genotipos a principios de enero con un total de 330 mm de agua. Bajo estas condiciones los rendimientos fueron destacadamente superiores a los de este trabajo dado que los valores alcanzados fueron 2.260, 2.170 y 2.452 kg ha<sup>-1</sup> para cada cultivar (Agamenoni, 1995). Basándose en las diferencias de rendimiento halladas al realizar esta comparación se puede inferir que las condiciones ambientales consideradas como óptimas para el amaranto en relación al fotoperíodo, radiación y temperatura de un sitio productivo ubicado a menores latitudes se mantienen por un lapso de tiempo mayor, lo cual permitiría el desarrollo potencial del ciclo del cultivo.

Este trabajo alcanzó los mayores rendimientos económicos en los 3 genotipos evaluados en el primer ciclo productivo (2010-2011), mientras que en los años posteriores se observó un proceso de reducción en todas las fechas y genotipos estudiados, el cual fue más evidente en Dorado. Esta caída en el rendimiento podría estar asociada al proceso de conservación de material genético de un ciclo productivo para el siguiente. En la siembra del 2010-2011 la semilla utilizada provenía de otro sitio de estudio (Río Cuarto, Córdoba) con polinización abierta. Por el contrario, en los ciclos posteriores se utilizaron semillas conservadas de los ciclos anteriores las cuales fueron recolectadas de plantas que fueron forzadas a la autopolinización mediante encapuchado. Una manifestación de este efecto fue que en el ciclo 2012-2013 las plantas de Dorado mostraron características completamente diferentes a las del ciclo 2010-2011, las mismas eran mas pequeñas, mas ramificadas, de temprana inducción y con panojas mal formadas (Imágenes ilustrativas en Anexo).

Este efecto que se observó en los genotipos de modificar sus características morfológicas y reducir su producción a lo largo de los 3 años de ensayo también podría estar asociada a la respuesta adaptativa de los mismos al ambiente. Algunos autores mencionan que ciertas características del cultivo de amaranto se expresan o reprimen según las condiciones ambientales del sitio de producción, hecho determinado por la plasticidad morfológica del cultivo (Hauptli, 1977; Putman, 1990 citado por Ramírez, 2010).

Otra posible respuesta a la disminución del rendimiento hallada en los ensayos de esta tesis podría estar relacionada con la morfología floral de la especie la cual favorece una combinación de autopolinización y polinización cruzada dentro de las flores unisexuales, donde la autopolinización es más frecuente que la polinización cruzada (Hauptli y Jain, 1985). Las especies con sistema de apareamiento mixto pueden mantener un alto nivel de variación genética dentro de las poblaciones. En estos casos la pérdida de la variación genética puede ocurrir como resultado de la selección artificial de líneas puras (Mapes Sánchez y Espitia 2010).

Otra explicación al comportamiento observado en este trabajo estaría dada por una investigación en la que se analizó un conjunto de semillas de 3 especies de amaranto (*A. cruentus*, *A. caudatus*, y *A. lividus*) en condiciones de autopolinización y de polinización cruzada durante cuatro ciclos de producción. El resultado obtenido estableció que las poblaciones de estas especies son polimórficas con plantas autoestériles y autofértiles. Dentro de las poblaciones las plantas autoestériles fueron quienes tuvieron un mayor porcentaje de representación, mientras que las autofértiles eran sólo el 34,7%, 18,7% y 12,5% para *A. cruentus*, *A. caudatus*, y *A. lividus* respectivamente. Durante el primer año de aislamiento se halló un elevado nivel de autofertilidad, que disminuyó considerablemente durante los años posteriores debido al efecto de la endogamia (Zheleznov *et al.*, 2001). En esta tesis la

autopolinización redujo la variabilidad genética y las plantas autofértiles de la descendencia fueron disminuyendo de un ciclo para el otro.

La depresión por endogamia ocurre debido al apareamiento entre parientes, lo cual puede ocasionar deformaciones y baja viabilidad en los descendientes. Entre las características de este fenómeno podemos mencionar: manifestación de recesivos, pérdida de vigor, mayor mortalidad, aumento de esterilidad y rápida diferenciación entre familias. Comúnmente los caracteres más afectados por la consanguinidad son los del tipo reproductivo además de los morfológicos y fisiológicos (Cubero, 2003).

A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, a posteriori (ciclo 2013-2014) se sembraron en el mismo sitio experimental, con fecha coincidente a la 2° de los ensayos de esta tesis, los 3 genotipos procedentes del lote de semillas originales junto con semillas obtenidas por autopolinización en el ciclo 2012-2013. En este cultivo se permitió la libre polinización de las mismas. El material del ciclo 2010-2011 mostró desarrollo normal y buenos rendimientos mientras que el lote 2012-2013 manifestó nuevamente variación morfológica y caída del rendimiento respecto del material original, la cuales fueron más evidentes en el cultivar Dorado (datos inéditos). Con esta siembra fue posible descartar el efecto del ambiente sobre las variaciones observadas y reforzar el supuesto de depresión por endogamia con mayor susceptibilidad del cultivar Dorado.

Contrariamente a los resultados obtenidos en este ensayo, un trabajo realizado en México mostró rendimientos de 3.100 – 5.300 kg ha<sup>-1</sup> en *A. hypochondriacus* y 2.100 – 4.500 kg ha<sup>-1</sup> en *A. cruentus* con selecciones mejoradas por autopolinización (Espitia, 1992 citado por Matteucci, 1998). La mayor susceptibilidad a la autopolinización de los materiales genéticos utilizados en los ensayos de esta tesis podría deberse al proceso de selección realizado en las semillas disponibles en este país, el cual reduce la variabilidad genética en comparación a los materiales disponibles en su lugar de origen.

Respecto a los valores de rendimiento alcanzados en el Valle Inferior de Río Negro, al comparar los resultados obtenidos en esta tesis con diferentes ensayos realizados en distintos sitios productivos es posible observar que los mismos son notoriamente elevados. Valores obtenidos en un ensayo de evaluación de 18 genotipos de *Amaranthus* realizado en Anguil, el cual fue sembrado a fines de noviembre con riego complementario por goteo con rendimientos que varían entre 350 y 2.020 kg ha<sup>-1</sup> (Reinaudi, *et al.*, 2011). En el mismo sentido, un ensayo de fechas de siembra de 3 genotipos de *Amaranthus* en La Pampa Ondulada en condiciones de secano, logró rendimientos promedio que varían entre 760 y los 1.138 kg ha<sup>-1</sup> (Troiani *et al.*, 2004). Otros valores de rendimientos reportados varían entre 500 y 2.000 kg ha<sup>-1</sup>, y con mejores prácticas agronómicas se han alcanzado los 3.000 kg ha<sup>-1</sup> (Williams y Brenner, 1995). De igual modo, para la temporada 1992 – 1993, Sánchez *et al.*, (1993) dio a conocer datos de ensayos realizados en Sudamérica donde: en Perú los rendimientos fueron entre 800 y 3.500 kg ha<sup>-1</sup> dependiendo de la localidad; en Ecuador los rendimientos comerciales alcanzados varían entre 800 y 2.492 kg ha<sup>-1</sup>; en Bolivia los rendimientos a nivel productor varían entre 700 y 2.500 kg ha<sup>-1</sup>; y en Argentina investigaciones realizadas por Universidades Nacionales e INTA han obtenido rendimientos de 143 – 1.530 kg ha<sup>-1</sup>. En Chile para las temporadas de los años 1994 a 1997 los ensayos realizados alcanzaron rendimientos de hasta 5.314 kg ha<sup>-1</sup>. Estas variaciones en los rendimientos están sujetas a las características locales de donde se efectuó el cultivo, la tecnología aplicada y el genotipo utilizado.

Por otra parte, los rendimientos biológicos (Rb) fueron regularmente superiores en el cultivar Antorcha respecto de los valores alcanzados por el cultivar Mexicano en todas las fechas evaluadas y en todos los años de ensayo. Nuevamente se aprecia una reducción de esta variable en los sucesivos años de ensayo atribuida posiblemente a la depresión por

endogamia. Siembra tempranas incrementan la biomasa, por el contrario al retrasarse la fecha de siembra se observó una reducción de biomasa que podría atribuirse a la disminución de la asimilación neta (Yarnia *et al.*, 2010). Este comportamiento se manifestó claramente en el cultivar Antorcha, mientras que el cultivar Mexicano mostró un comportamiento variable entre fechas.

Respecto a los valores de biomasa alcanzados en el Valle Inferior de Río Negro, al comparar los resultados obtenidos en esta tesis con diferentes ensayos realizados en distintos sitios productivos es posible observar que los mismos son notoriamente elevados. En este sentido, en un ensayo que evaluaba en condiciones de secano 4 fechas de siembra (entre noviembre y enero) con 3 especies de amaranto durante 3 años (2000-2001-2002) en Anguil reportaron valores de biomasa entre 8.700 y 11.500 kg ha<sup>-1</sup> para la primera fecha, entre 7.190 y 11.700 kg ha<sup>-1</sup> para la segunda, entre 6.350 y 11.440 kg ha<sup>-1</sup> para la tercera y entre 5.620 y 9.196 kg ha<sup>-1</sup> para la cuarta fecha (Troiani *et al.*, 2004). Estos valores resultaron en todos los casos inferiores a los logrados en esta tesis.

En relación a Lp la evidente superioridad de Antorcha en todas las fechas y años estudiados respecto de Mexicano, podría estar asociada a una característica genética propia del cultivar que invierte mayores recursos en desarrollar panojas de mayor tamaño. La reducción de esta variable en los sucesivos años de ensayo podría estar atribuida a la depresión por endogamia.

El comportamiento de P1000 se mantuvo entre fechas y años para ambos genotipos estudiados por lo tanto, podría asociarse con un atributo genético característico de cada cultivar el cual no se vería afectado por el efecto del ambiente en las distintas fechas de siembra como tampoco por el efecto de depresión por endogamia.

En relación a Ngp la bibliografía menciona que un retraso en las fechas de siembra produce una reducción de esta variable (Yarnia *et al.*, 2010). Esta disminución no se observó en el ciclo 2010-2011, sin embargo, se manifestó en los restantes años de ensayo, lo que podría deberse a que en el ciclo inicial de cultivo no se manifestó el posible efecto de depresión por endogamia mencionado anteriormente. El comportamiento del Ngp se asemeja al observado PSp donde las diferencias en el ciclo 2012-2013 entre genotipos se diluyen, lo cual permitiría inferir que el comportamiento del PSp podría estar influenciado por el Ngp.

Dptc mostró que el cultivar Mexicano generalmente fue superior al cultivar Antorcha, sin observarse diferencias entre años, lo cual permite suponer que el posible efecto de depresión por endogamia observado en otras variables no afectó la Dptc.

Del análisis de los componentes del rendimiento se observaron relaciones entre ellos, las cuales determinaron los resultados obtenidos. De tal modo, el cultivar Antorcha logró generalmente valores de Lp, PSp y Ngp superiores a los alcanzados por el cultivar Mexicano, sin embargo, este último logró mayores valores de PSgp y Re. Se podría inferir que Antorcha destina más recursos al desarrollo de la estructura floral y al Ngp que Mexicano, el cual al poseer mayor tamaño de granos presenta mayor PSgp y en consecuencia mayor Re. La mayor Dptc de Mexicano seguramente incidió en los mayores Re logrados por este cultivar respecto de Antorcha. Este efecto no se apreció en la variable Rb dado que, pese al mayor número de plantas de este cultivar las mismas presentaron un desarrollo menor de biomasa respecto de Antorcha. La mayor pérdida de plantas observada en la primera fecha de ambos genotipos posiblemente estuvo relacionada a condiciones de menor temperatura del suelo así como ambiental.

Al evaluar el comportamiento de IC la superioridad de Mexicano en Re y a sus menores valores de Rb respecto de Antorcha en todas las fechas y años de estudio, hicieron que el IC

de Mexicano fuera regularmente superior respecto de Antorcha. En cuanto al momento de siembra podría considerarse que la segunda fecha es la que permite valores óptimos de rendimiento económico, rendimiento biológico y por lo tanto de IC en los 2 genotipos para los años evaluados.

Genotipos de bajo porte e IC mayor al 25% serían considerados en la producción de alimentos para consumo humano, mientras que aquellos con IC menor al 18% y con baja dominancia apical serían considerados para forraje (Matteucci, 1998). A partir de los resultados obtenidos en esta tesis ambos genotipos evaluados deberían ser considerados como forrajeros. Sin embargo, los Re logrados superan en la mayoría de los casos los publicados en el país, lo cual permite visualizarlos en la producción de alimento de calidad para consumo humano.

Los elevados rendimientos obtenidos en estos experimentos para las condiciones agroecológicas del Valle Inferior de Río Negro estarían relacionados al factor agua disponible mediante riego. Se podría inferir que el cultivar Mexicano es más eficiente en el uso de los recursos dado que logra mayores rendimientos económicos con valores de biomasa menores o iguales a los de Antorcha.

### **3.5. Conclusiones**

En este ensayo se evidencia la adaptabilidad del cultivo de amaranto a la zona del Valle Inferior de Río Negro sin embargo, este cultivo no sería factible sin la práctica de riego dada la variabilidad en la distribución de las precipitaciones durante los primeros estadios de desarrollo del cultivo donde el mismo presenta mayor susceptibilidad al estrés hídrico.

Entre los materiales genéticos evaluados *A. cruentus* cv Mexicano presentó la mejor respuesta adaptativa a la zona dado que durante los ciclos productivos estudiados presentó

menor pérdida de plantas a cosecha, homogeneidad en el desarrollo de las mismas, menor susceptibilidad a enfermedades y destacados rendimientos económicos y biológicos.

La fecha de siembra óptima para la zona de estudio sería principios del mes de diciembre dado que permite cumplir adecuadamente el ciclo fenológico del cultivo con los mayores valores de rendimiento económico y biológico.

Es importante destacar la sensibilidad que presentaría el amaranto a la depresión por endogamia cuando se fuerza a la autopolinización. Si bien Mexicano mostraría menor susceptibilidad, esta práctica no sería recomendable.

## 4. FENOLOGÍA DEL CULTIVO

---

### 4.1. Introducción

La ontogénesis de un cultivo se centra en el desarrollo del mismo a través de una continuidad de estadios que le permiten completar su ciclo de vida. Entre estos estadios encontramos la etapa vegetativa, reproductiva, el llenado del grano y la madurez. El tiempo de duración de cada fase está determinado por la interacción entre el genotipo y el ambiente. Se define como *Fenología* al ritmo estacional de las fases que integran el ciclo de vida de una planta, y su variación según la influencia del clima y el ambiente. El diseño de modelos que puedan predecir el ritmo en el que se suceden las fases fenológicas de un cultivo es importante para entender el manejo del mismo (Chew *et al.*, 2012).

El fotoperíodo, la biosíntesis, la señalización de hormonas, la calidad de la luz y la temperatura ambiente son algunos de los factores que causan la activación de genes implicados en la transición de un estadio al siguiente (Boss *et al.*, 2004). Mediante la fenología de un cultivo es posible evaluar la incidencia de las variables meteorológicas y propias de cada especie en las manifestaciones periódicas o estacionales de la ontogénesis de las plantas.

El amaranto, debido a su gran variabilidad genética, presenta una excepcional capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales y, por ser una especie C<sub>4</sub> fotosintetiza con altas intensidades de luz y temperatura con un adecuado desarrollo (Covas, 1994; Troiani *et al.*, 2004; López *et al.*, 2004). Factores tales como fotoperíodo, radiación y temperatura tienen gran influencia en el desarrollo del cultivo de amaranto por lo que al variar las fechas de siembra, varía la productividad del cultivo como respuesta a las condiciones ambientales a las que se expone a lo largo de la estación de crecimiento (Whitehead *et al.*, 2002; González Jiménez y Guadarrama, 2005; Schahbazian *et al.*, 2006; Khandaker *et al.*, 2009; Mapes Sánchez y Espita, 2010).

Los diferentes estadios fenológicos del amaranto han sido identificadas en las siguientes etapas (Mujica y Quillahuamán, 1989; Henderson, 1993):

**Emergencia:** *etapa en la cual las plántulas emergen del suelo y muestran sus cotiledones extendidos. Las hojas verdaderas sobre los cotiledones tienen un tamaño menor a 2 cm de largo. Esta etapa se ha establecido cuando al menos el 50% del surco se halla en este estado. Esta etapa puede durar de 8 a 21 días dependiendo de las condiciones agroclimáticas.*

**Fase vegetativa:**  $(V_1...V_n)$  *este estadio se determina contando el número de nudos en el tallo principal donde las hojas se encuentran expandidas al menos en 2 cm de longitud. El primer nudo corresponde al estado  $V_1$  el segundo es  $V_2$  y así sucesivamente. A medida que las hojas basales senescen la cicatriz que queda en el tallo se utiliza para considerar el nudo que corresponda. Esta fase varía de 120 a 170 días según factores agroambientales, genotipo y época de siembra.*

**Fase reproductiva:** *se inicia con la aparición de las yemas reproductivas apicales, que darán origen a la inflorescencia. Este período incluye las siguientes etapas:*

**Inicio de panoja:** *Durante este estadio el ápice de la inflorescencia se hace visible en el extremo del tallo. Se observa entre 50 y 70 días después de siembra.*

**Panoja:** *La panoja tiene al menos 2 cm de largo. La floración empieza de 8 a 10 días luego de iniciada la formación de la panoja y comúnmente comienza en el punto medio del eje central de la misma y en los días siguientes la floración avanza hacia arriba y hacia debajo de cada racimo y hacia los racimos vecinos. En pocos días casi todos los racimos principales de la panoja muestran las flores abiertas, es por esto que*

*suele creerse que el amaranto inicia su floración en toda su longitud de panoja simultáneamente.*

**Término de panoja:** *La panoja tiene al menos 5 cm de largo y puede alcanzar longitudes mayores a 50 cm.*

**Antesis:** *En este estadio se encuentra al menos una flor abierta que deja visible los estambres separados y el estigma. Comúnmente la antesis se inicia en el eje central de la panoja y se continúa hacia las ramificaciones laterales de la misma. Las flores hermafroditas son las primeras en abrir. Este estadio puede dividirse en diferentes sub-estadios según el porcentaje de flores del eje central de la panoja que han logrado completar la antesis. La etapa de floración debe ser observada durante el mediodía, dado que en las horas de la mañana y durante el atardecer las flores se encuentran cerradas. En el transcurso de esta etapa, las hojas inferiores más viejas y menos eficientes fotosintéticamente comienzan a caer, y la sensibilidad a las bajas temperaturas y al estrés hídrico es alta.*

**Llenado de granos:** *La antesis se ha completado en al menos el 95% del eje central de la panoja. Esta etapa puede dividirse en:*

**Grano lechoso:** *Las semillas al ser presionadas entre los dedos, dejan salir un líquido lechoso.*

**Grano pastoso:** *Las semillas al ser presionadas entre los dedos presentan una consistencia pastosa de color blanquecino.*

**Madurez fisiológica:** *Esta etapa es de difícil determinación, el cambio de color de la panoja suele ser el indicador más utilizado. Las panojas verdes cambian a un color dorado y en panojas rojas cambian a una coloración café-rojizo. Las semillas son duras y no es*

*posible romperlas. Por otra parte, al sacudir las panojas ocurre la caída de las semillas maduras.*

**Madurez de cosecha:** *Las hojas senescen y caen, la planta presenta un aspecto seco de color café. Generalmente se espera que caiga una helada de otoño para que disminuya la humedad de la semilla.*

La fecha óptima de siembra está condicionada a las características ambientales del sitio productivo lo cual incide de manera importante en el desarrollo de las diferentes etapas fenológicas del cultivo (González y Rojo, 2005). La elección de la variedad también se relaciona con las condiciones agroclimáticas y la fecha de siembra. Si la variedad seleccionada se siembra fuera de época se verá reducida notablemente en sus rendimientos. Por lo tanto, la fecha de siembra está íntimamente relacionada con el ciclo ontogénico de la variedad seleccionada y de las condiciones agroclimáticas donde se llevará a cabo el cultivo (Mujica *et al.*, 1997). Con variedades de ciclos intermedios o largos es conveniente realizar la siembra con anticipación lo cual permite evadir el período de heladas tempranas. En cultivo de secano con variedades precoces la siembra puede retrasarse y de este modo evitar un posible riesgo de estrés hídrico durante el período vegetativo debido a la ocurrencia irregular de las precipitaciones del período estival. Sin embargo, en estos casos puede ocurrir estrés hídrico durante el período reproductivo lo que reduciría notablemente los rendimientos. Por este motivo es muy importante realizar la siembra de la variedad seleccionada en el momento oportuno para un óptimo desarrollo fenológico (Tavitas y Hernández., 2012).

El concepto de unidades de calor (UC) o tiempo térmico (TT) fue introducido en el año 1730 y desde entonces surgieron numerosos métodos de cálculo, todos ellos de gran utilidad para estudios que permiten una mejor descripción y predicción de los diferentes procesos

fenológicos. Las UC expresadas en grados días de desarrollo (GDD) son frecuentemente utilizadas en la descripción de tiempos de procesos biológicos (Mc Master y Wilhelm, 1997).

Como se mencionó anteriormente el ciclo biológico cambia con el clima es decir, plantas con el mismo genotipo sembradas bajo distintas condiciones climáticas pueden presentar diferentes estados de desarrollo después de transcurrido el mismo tiempo cronológico. Esta escala dificulta la comparación entre ambientes, años y genotipos, con lo cual cobra importancia el uso de las UC. Esta metodología ha sido utilizada en numerosas aplicaciones tales como clasificar plantas por su tasa de floración o la longitud de ciclo, estimar el momento de madurez a cosecha, o predecir la duración entre dos etapas de desarrollo (Miller *et al.*, 2001). La definición de GDD se completó con el descubrimiento del *umbral de temperatura acumulada*, valor necesario para florecer, y que varía con el fotoperíodo. La respuesta a la temperatura de la mayoría de las plantas es descrita en términos de temperaturas cardinales: *temperaturas base o mínima* ( $T_b$ ); *temperatura óptima* ( $T_o$ ); y *temperatura máxima o letal* ( $T_m$ ), las cuales se utilizan para el cálculo de GDD (Chew *et al.*, 2012).

La mayoría de las plantas responden al fotoperíodo, y en general, plantas de día corto y de día largo responden demorando la floración cuando son sometidas a fotoperíodos largos o cortos respectivamente. En plantas de tipo cuantitativo sometidas a fotoperíodos no-inductivos la floración es demorada pero no prevenida, mientras que en plantas de tipo cualitativo si el fotoperíodo está fuera del umbral crítico la floración no ocurre (Taiz. y Zeiger, 2006).

El amaranto es una planta de días cortos que modifica sus procesos de desarrollo rápidamente a medida que las siembras se retrasan. Fechas de siembra tempranas favorecen el desarrollo vegetativo de la planta mientras que, las fechas tardías inducen el panojamiento en

menor número de días en plantas con menor desarrollo. Como regla general se puede decir que el género *Amaranthus* crece vegetativamente en días largos y florece cuando los días comienzan a acortarse (U.S. Department of Agriculture, 1979; Joshi y Rana, 1991; Kaul *et al.*, 1996; Schahbazian *et al.*, 2006; Mapes Sánchez y Espita, 2010). Así mismo, un estudio con 31 genotipos de amaranto reveló en algunos de ellos respuestas al fotoperíodo del tipo cualitativa y en otros de tipo cualitativo (Nieto, 1986).

Conocer el comportamiento fenológico del amaranto para las condiciones edafoclimáticas del Valle Inferior del Río Negro por medio de una metodología extrapolable tal como los GDD permitirá establecer un adecuado manejo del cultivo y una mejor interpretación del potencial de desarrollo del mismo y su comparación con otros sitios de producción.

#### **4.2. Materiales y métodos**

A partir del ensayo de fechas de siembra y genotipos realizado (Capítulo 3), y durante los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012, se llevó a cabo el seguimiento fenológico del cultivo sobre los 3 materiales genéticos utilizados: *A. cruentus* cv Mexicano, *A. hypochondriacus* cv Dorado, *A. hypochondriacus* cv Antorcha.

##### **4.2.1. Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado en este ensayo fue el de parcela dividida con factor principal en bloques, el cual consiste en dividir las parcelas en subparcelas y aplicar un grupo de tratamientos en las parcelas y otro grupo de tratamientos en las subparcelas.

En este ensayo los tratamiento asignados a las parcelas estaban determinados por la fecha de siembra como factor principal a analizar. En las subparcelas los tratamiento estaban definidos por los genotipos seleccionados. Los años fueron considerados como un factor fijo

dado que se trata de años consecutivos sobre el mismo material genético, lo cual genera una secuencia de resultados.

La superficie de cada subparcela o subunidad experimental fue de 10,50 m<sup>2</sup> en la cual se sembraron 4 surcos de 5,00 m de largo separados entre sí a 0,70 m. Cada fecha de siembra contó con un número de 3 bloques.

#### **4.2.2. Manejo del cultivo**

Las características edáficas del sitio experimental para cada uno de los años de ensayo corresponden a los mencionados en el capítulo anterior (Tablas 3.1 del capítulo 3).

El manejo general del cultivo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos. Las fechas de siembra específicas de estos ensayos se detallan en la Tabla 3.2 del capítulo 3.

Las variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración fueron registradas mediante la estación meteorológica del sitio de estudio (Figuras 2.3 y 2.4 del capítulo 2).

#### **4.2.3. Datos recolectados**

Durante el desarrollo del ciclo productivo en cada subparcela se determinaron según la fecha y el genotipo diferentes estadios fenológicos tales como:

**Días a emergencia (E):** número de días transcurrido desde el momento de la siembra hasta observar el 50% de la población de plántulas emergidas con sus dos cotiledones extendidos.

**Días a inicio de panojamiento (IP):** número de días desde la siembra hasta observar la aparición macroscópica del primordio floral en el extremo terminal del tallo en el 2-5% de las plantas y **días a 100% de panojamiento (100%P)** cuando todas las plantas

muestran la aparición macroscópica del primordio floral en el extremo terminal del tallo.

**Días a inicio de antesis (IA):** número de días desde la siembra hasta observar el 50% de las flores masculinas abiertas en el 2 - 5% de las plantas de la parcela y, **días al 100% de antesis (100% A)** cuando todas las plantas de la población tenían el 50% de las flores masculinas abiertas.

**Días a grano lechoso (GL):** número de días desde la siembra hasta observar el 50% de las plantas con las semillas de la panoja que liberan un líquido lechoso al presionarlas entre las uñas.

**Días a grano pastoso (GP):** número de días desde la siembra hasta observar el 50% de las plantas con las semillas que al presionarlas entre las uñas presentan una mayor resistencia que el estadio anterior y liberan una sustancia consistencia pastosa y color blanquecino.

**Madurez fisiológica (M):** se consideraron diferentes parámetros tales como el cambio de color de la panoja (del verde al tostado o del rojo al café rojizo), la consistencia dura de las semillas (no se rompen al ejercer presión entre las uñas), manifestación de senescencia, caída de las hojas inferiores y desprendimiento de semillas.

Las variables fenológicas registradas se expresaron en tiempo cronológico así como en grados días de crecimiento (GDD: growing degree days). Para determinar los GDD se utilizó la fórmula:

$$\text{GDD} = [(T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2] - T_{\text{base}}$$

Donde  $T_{\text{max}}$  es la temperatura del aire máxima diaria,  $T_{\text{min}}$  es la temperatura mínima diaria del aire, y  $T_{\text{base}}$  la temperatura por debajo del cual el proceso de interés no progresa. La  $T_{\text{base}}$

varía entre las especies y genotipos y probablemente varía con la etapa de crecimiento (Wang, 1960). En el caso del amaranto se considera la  $T_{base}$  de 8 °C dado que este cultivo cesa su crecimiento por debajo de la misma (NRC, 1984). Cuando las temperaturas comienzan a disminuir puede ocurrir que:

$$[(T_{max} + T_{min}) / 2] < T_{base}$$

Por lo tanto se hace necesario mejorar el significado biológico de la ecuación. Para ello aquí se utilizó la interpretación sugerida por McMaster y Wilhelm (1997) que propusieron que en ese caso:

$$[(T_{max} + T_{min}) / 2] = T_{base}$$

Esto ha resultado en el método más difundido para el cálculo de GDD en los modelos de simulación utilizados en cereales de grano pequeño.

#### 4.2.4. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de los ensayos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA). El test de ANOVA se aplicó primeramente a la variable días a madurez del cultivo, dado que la misma representa la totalidad del ciclo productivo de la planta, y se realizó la comparación de medias mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años (Tabla 4.1). A continuación, el ciclo de crecimiento del cultivo se dividió en 6 períodos (E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; y M: madurez) que fueron analizados mediante el test de ANOVA. En la mayoría de las variables (IP, IA, GL, GP, M) este test, detectó interacción con los años sin embargo, la magnitud de la misma fue despreciable ( $\text{Eta}^2 < 1\%$ ), lo cual no invalidó el efecto de las fechas de siembra.  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006). Las comparaciones

de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). El procedimiento antes mencionado se aplicó a las variables fenológicas descritas en tiempo cronológico (en días) así como, en GDD de crecimiento.

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Variables fenológicas expresadas en días

En la variable M, se observó un importante efecto de las fechas de siembra ( $\text{Eta}^2$  88%) que se visualiza en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Valores promedios en días después de la siembra (DDS) para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 según fecha de siembra y genotipo.

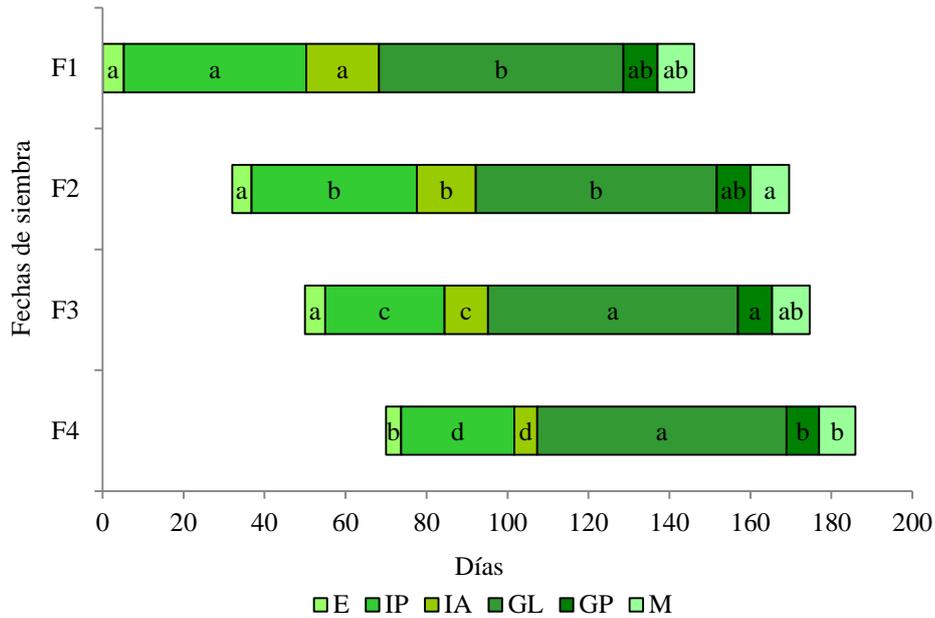
|    |     | E    | IP    | 100% P | IA    | 100% A | GL     | GP     | M        |
|----|-----|------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|----------|
| F1 | Ant | 5,17 | 51,00 | 98,83  | 66,17 | 113,33 | 128,67 | 137,33 | 145,67 a |
|    | Mex | 5,33 | 49,33 | 105,17 | 72,83 | 119,00 | 128,17 | 135,17 | 145,33 a |
|    | Dor | 5,33 | 50,50 | 99,17  | 65,83 | 112,50 | 129,00 | 138,67 | 147,33 a |
| F2 | Ant | 4,83 | 46,83 | 94,83  | 58,00 | 110,67 | 119,17 | 127,67 | 137,33 b |
|    | Mex | 4,83 | 46,33 | 97,83  | 63,17 | 111,67 | 119,67 | 127,00 | 136,57 b |
|    | Dor | 4,83 | 43,67 | 94,17  | 59,33 | 108,50 | 120,17 | 128,00 | 135,60 b |
| F3 | Ant | 5,00 | 33,67 | 86,50  | 43,83 | 99,00  | 107,17 | 114,17 | 121,83 c |
|    | Mex | 5,00 | 33,83 | 90,83  | 45,67 | 100,50 | 106,83 | 114,17 | 123,33 c |
|    | Dor | 5,00 | 35,83 | 86,33  | 46,17 | 97,17  | 106,67 | 114,50 | 122,83 c |
| F4 | Ant | 3,83 | 31,83 | 80,00  | 38,17 | 91,50  | 98,67  | 105,67 | 112,50 d |
|    | Mex | 3,67 | 31,50 | 83,50  | 37,50 | 91,50  | 98,50  | 105,00 | 112,67 d |
|    | Dor | 3,67 | 31,83 | 79,00  | 36,33 | 90,83  | 99,67  | 106,50 | 114,00 d |

E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; 100% P: 100% de panojamiento, IA: inicio de antesis; 100%A: 100% de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; Dor: cultivar Dorado; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

Al comparar las fechas de siembra entre sí, se detectaron diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ), evidenciándose en todos los casos una reducción en el número de días conforme se retrasó la fecha de siembra. En cuanto a los genotipos no se detectaron diferencias estadísticas significativas en la duración total del ciclo dentro de cada fecha de siembra. La 4<sup>o</sup> fecha de siembra fue la cual necesitó en todos los casos menor número de días para alcanzar cada uno de los estadios fenológicos y por lo tanto para completar su ciclo.

Al analizar puntualmente cada una de las etapas fenológicas se observó en la mayoría de ellas (IP, IA, GL, GP, M) interacción triple  $A \times F \times C$ , a pesar de ello, la magnitud de la misma no invalidó el efecto de las fechas de siembra ( $E_{ta}^2 > 20\%$ ). Se detectó un acortamiento en la duración del ciclo del cultivo, el cual fue aproximadamente de 10 días entre fecha y fecha, dándose principalmente en las etapas de IP e IA (Figura 4.1). Este acortamiento comenzó desde la etapa de E donde el test estadístico detectó diferencias ( $p < 0,01$ ) significativas entre la 4<sup>o</sup> fecha y las restantes con una magnitud de 1 día y fracción.

En IP la magnitud del acortamiento del ciclo entre fechas fue de 17 días como máximo. Para la variable IA se detectó diferencias significativas entre las fechas de siembra, observándose que este período se acortó conforme se retrasó la fecha de siembra. La magnitud máxima de las diferencias entre fechas de siembra para este estadio fue de 12,5 días.



**Figura 4.1.** Longitud del ciclo de cultivo en días para las diferentes etapas fenológicas evaluadas en cada una de las fechas estudiadas. E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica. Valores dentro de un mismo estadio seguido de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En GL la tendencia fue opuesta a la observada en los restantes estadios, el número de días incrementó en la 3° y 4° fecha aunque, la magnitud de las diferencias no superó los 2 días.

En los estadios de GP y M, las diferencias halladas fueron estadísticamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre fechas, sin embargo, la magnitud de las mismas no superó los 2 días en GL y resultaron menores a 1 día en GP y M.

#### 4.3.2. Variables fenológicas expresadas en GDD

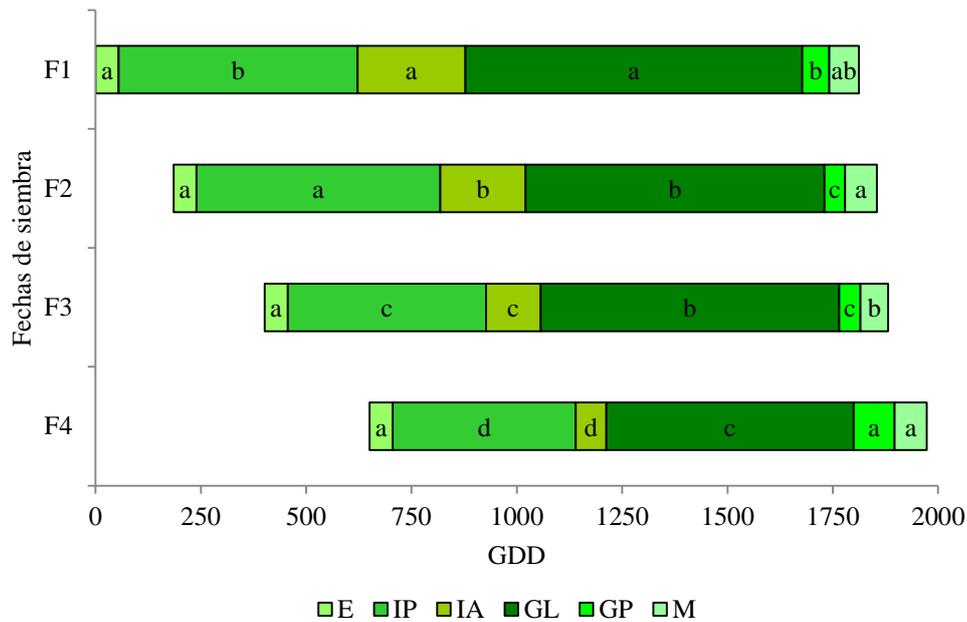
Al expresar el comportamiento fenológico promedio de los 3 genotipos en GDD para los 2 años de ensayo se observó el mismo patrón de reducción de los diferentes estadios del cultivo conforme se retrasó la fecha de siembra (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2.** Valores promedios en grados días (GDD) para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 según fecha de siembra y genotipo.

|    |     | E     | IP     | 100% P  | IA     | 100% A  | GL      | GP      | M         |
|----|-----|-------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|-----------|
|    | Ant | 54,39 | 633,93 | 1366,09 | 870,85 | 1491,26 | 1679,47 | 1739,34 | 1811,92 c |
| F1 | Mex | 56,23 | 611,92 | 1395,71 | 895,74 | 1551,67 | 1671,13 | 1725,68 | 1801,37a  |
|    | Dor | 54,60 | 621,41 | 1364,12 | 867,05 | 1484,38 | 1681,93 | 1758,73 | 1821,20 b |
|    | Ant | 54,07 | 637,84 | 1315,65 | 821,89 | 1460,10 | 1537,50 | 1589,35 | 1677,53 e |
| F2 | Mex | 54,07 | 635,58 | 1348,33 | 859,65 | 1470,09 | 1542,68 | 1589,35 | 1665,93 e |
|    | Dor | 54,07 | 626,95 | 1305,35 | 824,61 | 1431,42 | 1553,85 | 1602,93 | 1664,83 d |
|    | Ant | 54,89 | 519,01 | 1269,97 | 640,36 | 1325,80 | 1366,77 | 1413,10 | 1472,52 f |
| F3 | Mex | 54,89 | 517,37 | 1333,43 | 662,76 | 1348,90 | 1361,37 | 1412,12 | 1485,68 g |
|    | Dor | 54,89 | 540,00 | 1262,38 | 661,46 | 1262,38 | 1362,10 | 1417,92 | 1481,12 h |
|    | Ant | 56,31 | 493,44 | 1073,37 | 570,51 | 1100,31 | 1149,38 | 1245,03 | 1320,00 j |
| F4 | Mex | 54,44 | 485,08 | 1148,12 | 562,84 | 1090,12 | 1142,58 | 1234,95 | 1318,83 i |
|    | Dor | 54,44 | 489,83 | 1035,42 | 551,44 | 1088,67 | 1154,45 | 1258,02 | 1329,67 j |

E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; 100% P: 100% de panojamiento, IA: inicio de antesis; 100%A: 100% de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica; Ant: cultivar Antorcha; Mex: cultivar Mexicano; Dor: cultivar Dorado; F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

Al analizar el comportamiento de cada una de las etapas fenológicas en GDD se observó en la mayoría de ellas (IP, IA, GL, GP, M) una interacción triple  $A \times F \times C$ , a pesar de ello la magnitud de la misma no invalidó el efecto de las fechas de siembra ( $E_{ta}^2 > 20\%$ ). Se detectó un acortamiento en la duración del ciclo del cultivo conforme se retrasó la fecha de siembra de aproximadamente 160 GDD en promedio entre fecha y fecha, principalmente en las etapas de IP, IA y GL (Figura 4.1).



**Figura 4.2.** Longitud del ciclo de cultivo en grados días de crecimiento (GDD) para las diferentes etapas fenológicas en cada una de las fechas de siembra estudiadas. E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

Las diferencias entre 1 y 4<sup>o</sup> fecha de siembra fueron graduales y correspondieron a 1, 145, 180, 210, 48 y 12 GDD para los estadios de E, IP, IA, GL, GP y M, respectivamente.

En concordancia con la Figura 4.1 IP e IA aportan a la reducción de la longitud del ciclo, sin embargo, GL sería el que contribuye en mayor medida a la reducción del ciclo, hecho que no se manifestó cuando se evaluó la fenología en relación al tiempo cronológico (Figura 4.2).

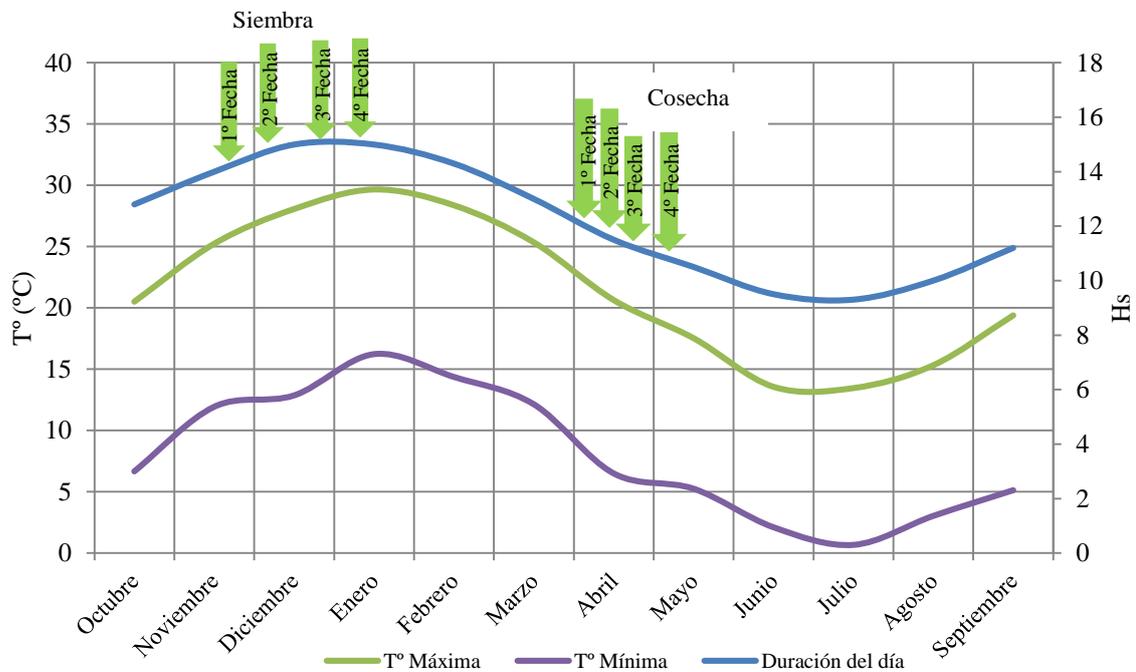
#### 4.3.3. Variables meteorológicas

Las variables meteorológicas de temperatura máxima, mínima y media mostraron un comportamiento similar en los distintos años de ensayo (Figuras 2.3 y 2.4 del Capítulo 2).

En el período estival la temperatura máxima promedio para las distintas fechas y años de estudio mostró valores cercanos a 30°C y una duración del día máxima de 14 hs aproximadamente. Las mismas comenzaron a disminuir a partir del 21 de diciembre para

llegar al momento de cosecha con valores promedios de 10,5 hs de luz y 20°C de temperatura máxima. A partir de la última fecha de siembra la temperatura mínima desciende notoriamente hasta el momento de cosecha (Figura 4.3).

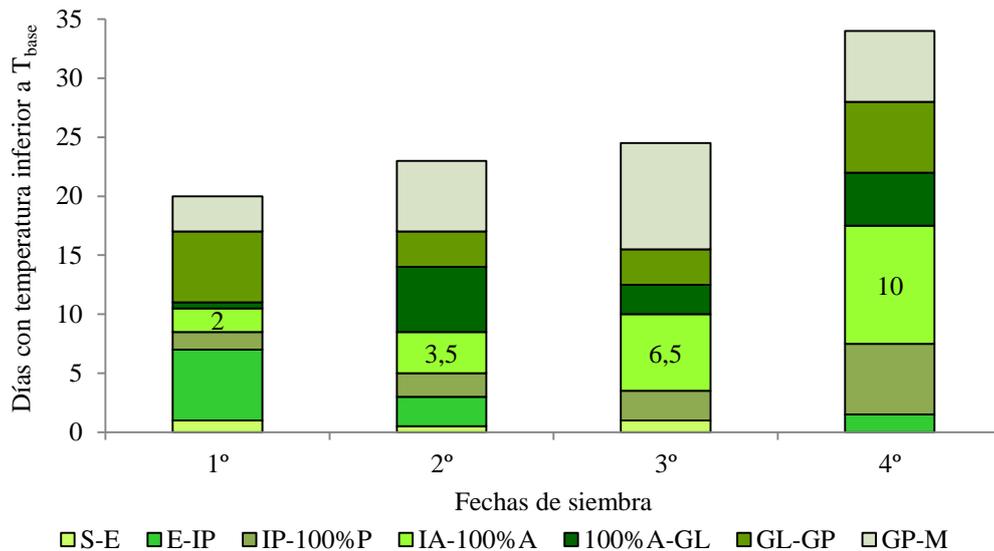
En relación a la temperatura del suelo, la misma se mantuvo por encima de los 20°C prácticamente en todo el ciclo del cultivo (Figura 2.7 del Capítulo 2). Esto concuerda con lo hallado por Webb *et al.* (1987) donde emergencias de campo satisfactorias serían logradas con temperaturas de suelo entre 18.5 °C (85% emergencia) y 24 °C (95% emergencia).



**Figura 4.3.** Comportamiento de la temperatura máxima, mínima y de las duración del día en promedio para los años de ensayo evaluados según las fechas de siembra y cosecha utilizadas.

Las temperaturas mínimas juegan un papel de destacada importancia en el desarrollo del cultivo, por esta razón se cuantificó la frecuencia de días con temperaturas menores a 8°C ( $T_{base}$ ) en cada una de las etapas fenológicas del cultivo para los ciclos de estudio que

posteriormente fueron promediadas. Se observó una tendencia a incrementar el número de días con temperaturas inferiores a la  $T_{base}$  conforme se retrasó la fecha de siembra (Figura 4.4). Es importante destacar que el aumento de número de días con temperaturas inferiores a 8 °C fue más relevante en el estadio de antesis.



**Figura 4.4.** Frecuencia media en días con temperaturas inferiores a  $T_{base}$  para los diferentes estadios fenológicos estudiados en los ciclos productivos ensayados. S-E: siembra-emergencia; E-IP: emergencia-inicio de panojamiento; IP-100% P: inicio de panojamiento-100% de panojamiento; IA-100%A: inicio de antesis-100% de antesis; 100%A-GL: 100% de antesis-grano lechoso; GL- GP: grano lechoso-grano pastoso; GP-M: grano pastoso-madurez; 1°: 1° fecha de siembra, 2°: 2° fecha de siembra; 3°: 3° fecha de siembra; 4°: 4° fecha de siembra.

#### 4.4. Discusión

De los resultados obtenidos en los ensayos de esta tesis se observó un acortamiento en días del ciclo de desarrollo conforme se retrasó la fecha de siembra. Se podría inferir que el período que determinó las diferencias encontradas en el ciclo del cultivo es aquel que ocurrió entre el momento de siembra y el inicio de antesis dado que, ninguno de los restantes estadios contribuyó significativamente a la reducción de la longitud de ciclo. En efecto, la duración del ciclo del cultivo sembrado en la 4° fecha fue aproximadamente de 30 días menos en comparación con el sembrado en la 1° fecha. *A. cruentus* es considerado menos sensible al

fotoperíodo y por tal motivo mantiene largos períodos de crecimiento vegetativo (Kauffman y Weber, 1990). En el caso particular de esta tesis, *A. cruentus* cv Mexicano manifestó este comportamiento ya que tardó más días en alcanzar los estadios de 100%P, AI, 100%A en la 1°, 2° y 3° fecha de siembra estudiadas. Sin embargo, en la 4° fecha esta diferencia no se manifestó y mostró similar comportamiento entre genotipos. Algunos ejemplares salvajes (considerados malezas) son de fotoperiodicidad intermedia y comienzan a florecer en días largos, antes de ser expuestos a días cortos, aunque presentan tamaños pequeños con rendimientos pobres (Brenner y Widrlechner, 1998).

En concordancia con los resultados obtenidos, un ensayo de evaluación de fechas de siembra en La Pampa (Argentina) con tres cultivares de amaranto mostró un acortamiento de los días a antesis conforme se retrasó la fecha de siembra (Troiani *et al.*, 2004). Los lapsos en días para los diferentes estadios fenológicos de los ensayos de esta tesis difieren de los encontrados por Mujica y Quillahuamán, (1989) y Henderson (1993). Así mismo, un trabajo de evaluación de una importante colección de germoplasma de *Amaranthus* evidenció diferencias en la ontogenia, las cuales fueron atribuidas a la sensibilidad del cultivo a la longitud del día y las condiciones ambientales del sitio donde se llevó a cabo el experimento (Wu *et al.*, 2000). A su vez, otro ensayo en La Pampa con 6 germoplasmas de amaranto sembrados a fines de diciembre mostró que las etapas fenológicas se cumplieron en: 4 - 5 días a apertura de cotiledones, 45 días a inicio de panojamiento, 79 días a antesis y entre 118 - 128 días a cosecha (Matteucci, 1998).

Al comparar los resultados de ese ensayo con los resultados obtenidos en esta tesis para una fecha de siembra coincidente (3° fecha de siembra) se observó que la duración del ciclo a cosecha fue similar en ambos sitios de cultivo. Así mismo, se apreciaron similitudes respecto de algunas variables como días a apertura de cotiledones y al momento de cosecha. En cambio, se hallaron ciertas diferencias tales como: una reducción en el número de días a

inicio de panojamiento y un alargamiento en el período de antesis. Por el contrario, un ensayo realizado en México con amaranto tipo “Azteca” en diferentes densidades de siembra y dosis de fertilización, sembrado en una fecha similar a la 4ª fecha de siembra de esta tesis, mostró en todos los tratamientos un período de 3 días a emergencia, 61 días a floración y 141 días a madurez (Díaz Ortega *et al.*, 2004). Si se considera la 2ª fecha como la óptima para el sitio experimental (sugerida a partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 3), el ciclo productivo del amaranto duraría en promedio 136 días.

Otro ensayo realizado en Tucumán con amaranto en diferentes fechas de siembra concluyó que fechas tempranas permiten al cultivo disponer de condiciones agroecológicas más favorables que dan lugar a la obtención de mayores rendimientos. Por otro lado Brandán *et al.* (2013) alertan que siembras tardías posibilitan el riesgo de heladas en el estado de grano lechoso con las consiguientes pérdidas de grano y calidad.

La temperatura es uno de los factores ambientales con mayor efecto sobre los procesos ontogénicos de los cultivos (Yan y Hunt, 1999). La comprensión de la interacción fotoperíodo-temperatura y sus efectos sobre la fenología es uno de los aspectos claves para la producción y más aún cuando se trata de un cultivo nuevo para una región determinada. Esta interacción condiciona la elección de variedades, la determinación de fechas de siembra y la predicción de las fechas de panojamiento, fechas de madurez y rendimiento final (Zhang *et al.*, 2001). Generalmente, tanto el crecimiento como el desarrollo de las plantas requieren temperaturas dentro de límites particulares. La temperatura *per se* no es un factor de crecimiento que proporcione energía a las plantas sino que, indirectamente controla la tasa de desarrollo y la morfogénesis, al controlar actividades metabólicas tales como reacciones químicas, solubilidad de los gases y absorción mineral y de agua (Rahman *et al.*, 2007). El

uso de los GDD incrementa la precisión para determinar la duración del ciclo de desarrollo, debido a que el mismo está regulado principalmente por la temperatura.

En esta tesis se observó que conforme se retrasó la fecha de siembra hubo un incremento del número de días con temperaturas inferiores a la  $T_{base}$ , temperatura por debajo de la cual cultivo cesa su crecimiento (NRC, 1984). Este incremento fue evidente en la 4<sup>o</sup> fecha de siembra en IA e IP, aspecto de suma importancia dado que durante estos estadios fenológicos la sensibilidad del cultivo a las bajas temperaturas es aún mayor (Sánchez *et al.*, 1993). Este hecho podría estar relacionado con la disminución del número de granos por panoja (Ngp) y la consecuente reducción del rendimiento en grano (Re) observada en el Capítulo 3.

En concordancia con lo antes mencionado, un ensayo de maíz realizado en los EEUU evaluó el impacto del retraso de la fecha de siembra en los GDD requeridos para la maduración del grano. Se observó que fechas tardías aumentan el riesgo de exposición a bajas temperaturas antes de la maduración del grano las cuales podrían ser letales para el mismo. En consecuencia, los productores prefieren utilizar híbridos de madurez temprana para minimizar este riesgo, dado que se observaron tasas lineales de disminución de los GDD conforme se retrasa la fecha de siembra (Thomison y Nielson, 2002). Trabajos realizados en maíz y sorgo con el objetivo de determinar la influencia de un retraso en la siembra sobre el número de GDD durante anthesis y maduración de grano, mostró que el tiempo térmico desde la siembra hasta anthesis se redujo (Nielsen *et al.*, 2002; Bandiougou, 2012).

El comportamiento de la duración del ciclo productivo del amaranto en función de los GDD ante las distintas fechas de siembra fue similar al observado en función del tiempo cronológico en días. Es decir, existe una reducción de los GDD conforme se retrasó la fecha de siembra que no es afectada por los genotipos. La reducción del ciclo productivo en función de los GDD entre la 1<sup>o</sup> y 2<sup>o</sup>, y entre la 2<sup>o</sup> y 3<sup>o</sup> fecha de siembra fue en promedio de 14 GDD

por día, mientras que entre la 3° y 4° fecha fue en promedio de 19 GDD por día. Cuando la duración del ciclo se expresó en GDD se vio que, a diferencia de cuando se expresó en días, con cada retraso de la fecha de siembra disminuyó tanto la duración de los estadios hasta floración como la duración de los estadios de llenado del grano (principalmente GL). A partir de estos resultados se puede inferir que para lograr un eficiente desarrollo del cultivo de amaranto en el Valle Inferior del Río Negro con valores de rendimientos óptimos se requiere al menos de 1400 GDD.

El comportamiento observado en estos ensayos concuerda con lo mencionado por Kelley (2011) quien afirma que el período de tiempo necesario para lograr los GDD requeridos para el desarrollo óptimo del ciclo de cultivo está en función de las temperaturas máximas y mínimas diarias que ocurren a lo largo de la estación de crecimiento, es decir de la fecha de siembra.

En el ensayo de Díaz Ortega *et al.* (2004) realizado en México con amaranto tipo “Azteca” en diferentes densidades y dosis de fertilización, sembrado en una fecha similar a la 4° fecha de siembra de esta tesis, se obtuvo valores de GDD durante el desarrollo fenológico del cultivo de: 35 GDD de siembra a emergencia, 704 GDD de emergencia a inicio de panojamiento y de 889 GDD de inicio de panojamiento a madurez fisiológica, es decir un total de 1629 GDD para el ciclo del cultivo. Si se comparan estos valores con los obtenidos en esta tesis, se pueden observar diferencias entre los distintos estadios, posiblemente debido a las condiciones ambientales propias de los sitios de estudio o bien a la  $T_{base}$  utilizada por este autor ( $T_{base} = 6^{\circ}\text{C}$ ) para calcular los GDD.

Mecanismos de señalización relacionados con la luz y la temperatura participan en la regulación del crecimiento y desarrollo de las plantas. Así, las plantas han integrado las señales ambientales y endógenas con el fin de regular varios procesos fisiológicos tales como

el momento de la floración. En *Arabidopsis thaliana* se han identificado cinco parámetros que controlan la floración: el fotoperíodo; la vernalización o requerimiento térmico; la iniciación floral; las giberelinas; y, la edad de la planta. El fotoperíodo y la temperatura son señales externas percibidas por las plantas y, en muchas especies, la floración es controlada por estos factores para optimizar la producción de semillas en ambiente específicos (Li *et al.*, 2016).

Comúnmente se considera que luz y temperatura están asociadas, dado que durante el día la temperatura es más alta que durante la noche. Sin embargo, por el momento no se sabe a ciencia cierta cómo hacen las plantas para coordinar la regulación de su desarrollo como por ejemplo la floración (Li *et al.*, 2016). Según Horie (1994) los requerimientos ambientales para florecer están relacionados con las condiciones en donde las plantas evolucionaron. Como la longitud del día es inalterable, a diferencia de la temperatura, la precipitación y la radiación solar, la floración de los cultivos depende fundamentalmente de su requerimiento de longitud del día y su desarrollo es producto de estrategias de adaptación al ambiente.

Por su parte Iannucci *et al.* (2008) mencionan la existencia de dos umbrales relacionadas con la floración: las unidades térmica (UT) y el fotoperíodo, y afirman que este estadio será alcanzado solo con valores mayores o iguales a sus respectivos umbrales. Otros autores, si bien sostienen que el ritmo de desarrollo de las plantas solo responderá al fotoperíodo entre la emergencia y la floración, proponen que habría otros procesos post-floración que podrían ser afectados por el fotoperíodo (Summerfield *et al.*, 1998; Craufurd and Wheeler, 2009). Por otro lado Yin *et al.* (1997) proponen la existencia de tres estados de desarrollo de prefloración: pre-inductivo o juvenil; inductivo; y post-inductivo; con la aclaración de que el fotoperíodo tendría solo efecto en la duración de la fase inductiva.

Por el contrario, se sabe que la temperatura afecta toda la ontogenia de las plantas (Horie, 1994) por lo que la duración de las fases vegetativa, reproductiva, llenado del grano y

maduración diferirán entre si según el genotipo y el ambiente en el que se desarrollen las plantas. Así, en arroz sembrado en el hemisferio Norte cada dos semanas entre febrero y junio, el número de días para florecer disminuyó a medida que se atrasó la fecha de siembra mientras que ocurre lo contrario para la fase de llenado del grano que aumenta levemente. Tanto el rendimiento económico como el biológico se redujeron con el retraso de la siembra por lo que puede decirse que la duración de cada estadio tiene influencia particular sobre el crecimiento y el rendimiento (Horie, 1994). Por otro lado, en algodón siembras tardías resultan en una reducción significativa de los días hasta 50% de floración, hasta 50% de apertura de cápsulas y hasta 50% de madurez (Ban *et al.*, 2015).

Sin considerar el proceso de vernalización se ha comprobado que variaciones de temperaturas durante el crecimiento inciden en el tiempo de floración. Por ejemplo, un fotoperíodo de día largo promueve una rápida floración de *A. thaliana* pero la demora bajo condiciones de día corto. Esta demora puede eliminarse si las plantas se desarrollan a altas temperaturas es decir, plantas con un número similar de hojas florecerán tanto bajo condiciones de día corto a 27°C como en condiciones de día largo a 21 °C (Fernández *et al.*, 2016). Craufurd y Wheeler (2009) mencionan que con temperaturas superiores a  $T_{base}$  el ritmo de desarrollo no es afectado por el fotoperíodo sino solo por la temperatura, sin embargo, el efecto del fotoperíodo así como el de la temperatura a temperaturas superiores a  $T_{base}$  no ha sido estudiado lo suficiente. Si a futuro, en la zona del Valle Inferior del Río Negro, el cambio climático produjera un aumento de la temperatura media con más días que excedan  $T_{base}$ , esto beneficiaría a especies originadas en los trópicos cuyos valores de  $T_{base}$  son más altos (Yin *et al.* 1997) lo cual favorecería la utilización del cultivo de amaranto (planta C4) en dichas zonas.

Los resultados obtenidos en esta tesis mostraron que a medida que se retrasó la fecha de siembra se acortaron las fases de prefloración y de llenado del grano, tanto en término de días

como de GDD. La tendencia observada en la fase de prefloración podría tener una explicación si se la relaciona con la evolución del fotoperíodo y las temperaturas máximas ocurridas durante esa etapa de la ontogenia del cultivo. En efecto, a diferencia de las dos primeras épocas de siembra, en la 3<sup>o</sup> y 4<sup>o</sup> fecha la emergencia de las plantas coincide con la época a partir del cual las horas de luz comenzaron a disminuir mientras que las temperaturas máximas se mantuvieron por sobre de los 25°C. Por el contrario, en la 1<sup>o</sup> y 2<sup>o</sup> fecha el cultivo estuvo gran parte de la prefloración bajo condiciones de días alargándose, fotoperíodo que sumado a las altas temperaturas máximas activaron la fase de inducción de la floración tal como mencionan Fernández *et al.* (2016). Este comportamiento podría asociarse a lo observado en esta tesis donde el número de hojas a inicio de floración (HIP) fue similar en todas las fechas y genotipos estudiados (Capítulo 3) con inicio de panojamiento en todos los casos posterior al acortamiento de la longitud del día pero con temperaturas máximas elevadas y temperaturas mínimas en aumento.

En cuanto al acortamiento de las fases de llenado del grano, tanto en días como en GDD, se puede explicar por la incidencia de las bajas temperaturas mínimas ya que a medida que se atrasó la fecha de siembra una mayor parte de la fase de llenado del grano se llevó a cabo bajo condiciones de temperaturas inferiores a la  $T_{base}$  de 8 °C.

A partir de estos resultados se puede inferir que para lograr un eficiente desarrollo del cultivo de amaranto en el Valle Inferior del Río Negro con valores de rendimientos óptimos, los umbrales antes mencionados que incidirían en la floración del cultivo podrían estimarse en valores menores a 14 h de luz y al menos 600 GDD de los 1400 GDD totales que deberían ocurrir antes del inicio de floración. La incidencia de la temperatura fue importante durante toda la ontogenia de este cultivo, tanto en la floración como en el llenado y secado del grano.

#### **4.5. Conclusiones**

La radiación, la temperatura y el fotoperíodo tienen gran influencia sobre el desarrollo del cultivo de amaranto por lo que al variar las fechas de siembra varía la productividad del cultivo en respuesta a la modificación de las condiciones ambientales a las que es expuesto a lo largo de la estación de crecimiento.

En síntesis el período de crecimiento vegetativo del amaranto se acorta bajo condiciones de reducción de longitud del día y temperatura media del aire, tal como ocurre hacia finales del período estival.

## 5. FERTILIZACIÓN NITROGENADA

---

### 5.1. Introducción

El nitrógeno (N) es un factor necesario para el óptimo desarrollo de los cultivos y en numerosas ocasiones condiciona los rendimientos de los mismos. Los altos requerimientos de este nutriente por parte de las plantas lo transforman en un factor limitante en todos los suelos del mundo. El N juega diferentes roles en la bioquímica de las plantas, es un constituyente esencial de los aminoácidos y por lo tanto de las enzimas, clorofila, ácidos nucleicos, hormonas, vitaminas, proteínas de almacenamiento, paredes celulares y de otros componentes celulares (Boote *et al.*, 1994). Consecuentemente una deficiencia de este nutriente puede tener una gran influencia en la supervivencia de la planta, el rendimiento, y la producción de proteína del grano.

La mayor parte del N presente en el suelo se encuentra bajo la forma orgánica, sin embargo, las plantas utilizan este elemento bajo formas inorgánicas como nitrato y amonio. Los microorganismos del suelo juegan un papel muy importante en la transformación del N de la forma orgánica a la inorgánica (Tisdale *et al.*, 1993). Cuando la planta absorbe nitrato debe reducirlo a la forma amoniacal antes de incorporarlo a los compuestos orgánicos, mientras que el amonio se incorpora directamente a compuestos procedentes del ciclo de Krebs.

La carencia de este nutriente se manifiesta como una reducción en: el crecimiento de la planta, el tamaño y número de hojas, ramificaciones, macollos y frutos. Suele observarse clorosis debido a la dificultad de síntesis de clorofila en las hojas de mayor edad dado que el N es un nutriente móvil sin embargo, en carencias severas puede aparecer en hojas jóvenes (Boote *et al.*, 1994).

Los fertilizantes minerales permiten incrementar la producción agrícola sin embargo, es difícil cuantificar su aporte. Mundialmente en la década del '90 se sostenía que valores

cercanos al 40% de la proteína para consumo humano tuvo origen en fertilizantes nitrogenados sintéticos (FAO, 2002).

La fertilización nitrogenada permite lograr buenos rendimientos, promover el crecimiento de los cultivos y prolongar los períodos de desarrollo de los mismos. El N está íntimamente relacionado con la actividad de las plantas por tanto, todo factor que comprometa el crecimiento y desarrollo de las mismas impedirá la utilización eficiente del nutriente. La respuesta del cultivo a las aplicaciones de N depende de factores edáficos, climáticos, propios del cultivo y del manejo del mismo (Quiroga *et al.*, 2003).

El suelo es la fuente de nutrientes para los cultivos y ante la limitante de alguno de ellos el crecimiento y los rendimientos de los mismos se verán reducidos por lo tanto, es necesario tener en cuenta la disponibilidad de todos los nutrientes para el desarrollo óptimo de cualquier cultivo (Tisdale *et al.*, 1993).

En el Valle Inferior de Río Negro ensayos a campo de fertilización nitrogenada y fosfatada en maíz determinaron que incrementaban significativamente los rendimientos con dosis entre 70-210 kg N ha<sup>-1</sup>, según los cultivos antecesores y condiciones edáficas. Aunque, no se hallaron efectos de la aplicación de fósforo (P) debido a la buena disponibilidad de este nutriente en los suelos del valle (Margiotta *et al.*, 1988; Martínez *et al.*, 2012).

Trabajos realizados en esta misma región mostraron los mayores rendimientos de maíz con dosis superiores a 280 kg N ha<sup>-1</sup>. A pesar de ello, la curva de respuesta del rendimiento a diferentes dosis de N mostró una disminución importante en su efecto entre los 150 y 200 kg N ha<sup>-1</sup>. Experiencias realizadas con productores en el marco de estos resultados demostraron en la mayoría de los casos que el punto de equilibrio económico de fertilización con N se alcanza con el agregado de 300 kg urea ha<sup>-1</sup>. En ensayos con altos rendimientos el equilibrio

se alcanzó con una fertilización de 180 kg N ha<sup>-1</sup> (390 kg urea ha<sup>-1</sup>) sin embargo, en tratamientos con menor número de riegos los rendimientos se redujeron y el equilibrio se logró con la aplicación de 120 kg N ha<sup>-1</sup> (Reinoso *et al.*, 2010; Martínez *et al.*, 2012).

En el caso particular del amaranto el N ha sido calificado como el elemento más restrictivo en el crecimiento del cultivo y a medida que el ambiente es más favorable debería aplicar en dosis mayores (Stallknecht y Schulz-Schafer, 1993). Este cultivo responde positivamente a la fertilización nitrogenada a pesar de ello, el tipo de fertilizante, momento y dosis de aplicación dependen fundamentalmente de las propiedades físico-químicas del suelo y de la respuesta de la planta a esas condiciones (Fasina *et al.*, 2008).

Elbehri *et al.*, (1993) sostienen que los requerimientos nutricionales del amaranto están definidos por las condiciones ambientales donde se desarrolla el cultivo y por la especie a sembrar, dado que las mismas responden de manera diferencial a la cantidad de N aplicado. Así mismo, es importante considerar la disponibilidad de humedad, la fertilidad propia del suelo en donde se va a sembrar y del cultivo antecesor.

Investigaciones realizadas mencionan que la disponibilidad de nitrógeno se encuentra limitada en años secos, a pesar de esta desfavorable condición las plantas responden a la fertilización (Marschner, 1995). Este hecho se ha observado en Amaranto donde trabajos realizados con fertilización nitrogenada en dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> en años secos, incrementaron el rendimiento y ciertos componentes del mismo. En cambio, en años donde las condiciones ambientales (temperatura, precipitaciones) resultaron más favorables para el cultivo, el mismo alcanzó óptimos rendimientos con bajas dosis (50 kg N ha<sup>-1</sup>) e incluso sin fertilización (Pospisil *et al.*, 2006).

Este cultivo ha demostrado incrementos del rendimiento en grano con dosis mayores a 90 kg N ha<sup>-1</sup> aunque en dosis de 180 kg N ha<sup>-1</sup> puede manifestar un efecto adverso a cosecha debido al incremento de la altura de la planta, caída de plantas y prolongada maduración de las semillas (Myers, 1998; Saini y Shekhar, 1998).

El N es un elemento de elevada solubilidad y movilidad en el suelo por ello se recomienda aplicarlo en 2 partes, una al momento de la siembra y la otra luego del primer control de malezas. En suelos de textura gruesa donde la lixiviación de nutrientes es alta, se recomienda fraccionar hasta en 3 aplicaciones (Soto, 2003).

Otra forma propuesta de fertilización del amaranto es con enmiendas orgánicas, la cual se fundamenta en el aprovechamiento de la biomasa de las plantas, residuos vegetales post-cosecha, excrementos animales, lodos residuales, desechos industriales, agroindustriales y urbanos, ya sea en estado sólido, líquido o semilíquido, que procesados y aplicados al suelo mejoran sus condiciones físicas, químicas y biológicas (Soto, 2003). La gallinaza y el compostaje han sido abonos orgánicos comunes en este cultivo, así como la incorporación de algunas leguminosas (Oliver *et al.*, 2002). Otra alternativa de fertilización orgánica es el lombricompost, donde la materia orgánica es degradada por lombrices, las cuales a través de su excreta la convierten en fertilizante de alta calidad (Campos, 2010). Otra alternativa estudiada es la utilización estiércol bovino, con la cual se logran importantes incrementos en el rendimiento (Morales *et al.*, 1990).

Este ensayo se planteó con el objetivo específico de evaluar diferentes dosis de fertilización nitrogenada en el cultivo de amaranto con la finalidad de establecer la dosis de fertilizante que permita alcanzar el óptimo productivo y económico para las condiciones edafoclimáticas del área de estudio.

## **5.2. Materiales y métodos**

Este ensayo se llevó a cabo durante los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013. El material genético utilizado fue: *A. cruentus* cv Mexicano, seleccionado a partir de ensayos preliminares.

### **5.2.1. Diseño experimental**

En cada año de ensayo se trabajó siguiendo un diseño experimental de 3 bloques con 5 tratamientos de diferentes dosis de fertilización nitrogenada distribuidos al azar dentro de cada bloque. La superficie de cada parcela o subunidad experimental fue de 14,00 m<sup>2</sup> en la cual se sembraron 4 surcos de 5,00 m de largo separados entre sí a 0,70 m.

Los tratamientos realizados fueron 5 los cuales correspondieron a diferentes dosis de N mediante el agregado de urea granulada (46 % N). A cada tratamiento correspondieron las siguientes dosis de N: T0) 0 kg N ha<sup>-1</sup> (control); T1) 50 kg N ha<sup>-1</sup>; T2) 100 kg N ha<sup>-1</sup>; T3) 150 kg N ha<sup>-1</sup>; T4) 300 kg N ha<sup>-1</sup>.

### **5.2.2. Manejo del cultivo**

Previo a la siembra se realizaron muestreos de suelo con el objetivo de determinar las características edáficas del sitio experimental para cada uno de los años de ensayo. El suelo presentó textura franca para ambos años de ensayo (Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal (L.A.S.A. y V.) de la Estación Experimental del Valle Inferior del Rio Negro), con propiedades químicas dentro de parámetros normales que lo califican de buena aptitud agrícola (Tablas 5.1).

El manejo general del cultivo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos (Capítulo 2). Las fechas de siembra específicas fueron 1/12/11 y 30/11/12 para cada uno de los años de estudio respectivamente.

Las variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración fueron registradas mediante la estación meteorológica del sitio de estudio (Figuras 2.3 y 2.4 del capítulo 2).

**Tabla 5.1.** Determinaciones químicas de los suelos de los ensayos de fertilización para los diferentes años de estudio.

| Ciclo     | Profundidad<br>cm | pH  | C.E.<br>mmhos cm <sup>-1</sup> | MO<br>(%) | Nt<br>(%) | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg Kg <sup>-1</sup> | P Olsen<br>mg Kg <sup>-1</sup> | S<br>mg Kg <sup>-1</sup> | Ca<br>mg Kg <sup>-1</sup> | Mg<br>mg Kg <sup>-1</sup> | RAS  |
|-----------|-------------------|-----|--------------------------------|-----------|-----------|---|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------|
| 2011-2012 | 0 - 20            | 8   | 0,85                           | 4,93      | 0,231     | 30,1  | 23,1                           | 35                       | 7230                      | 1170                      | 2,09 |
|           | 20 - 40           | 8,3 | 1,80                           | 3,97      | 0,169     | 17,5  | 14,2                           | 57                       | 7270                      | 1380                      | 2,5  |
|           | 40 - 60           | 7,9 | 2,25                           | 4,78      | 0,236     | 27,9  | 8,6                            | 188                      | 8730                      | 1340                      | 2,03 |
| 2012-2013 | 0 - 20            | 8,2 | 0,70                           | 4,59      | 0,204     | 28,7  | 25,2                           | 31,5                     | 8061                      | 865                       | 1,63 |
|           | 20 - 40           | 8,3 | 0,60                           | 3,26      | 0,170     | 22,7  | 16,8                           | 35,7                     | 8230                      | 1183                      | 1,88 |
|           | 20 - 40           | 8,2 | 2,60                           | 3,20      | 0,152     | 23,6  | 9,8                            | 247                      | 11886                     | 2160                      | 1,96 |

**Fuente:** Lanaqui, Laboratorio de Análisis Químicos. CERZOS-CONICET-UNS. C.E (conductividad eléctrica) y pH, ambos por método potenciométrico, MO: materia orgánica (Walkley y Black), Nt: nitrógeno total (Kjeldhal), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: nitrógeno de nitratos (método cromotrópico) P Olsen (fósforo extractable por metodología Olsen, 1954), S: azufre, Ca: calcio, Mg: magnesio (Emisión atómica), RAS (Relación adsorción sodio).

La fertilización se efectuó en forma localizada (cerca de la posición de las plantas), fraccionada en dos etapas según lo recomendado por Soto 2003. La primera aplicación a 60 cm de altura de planta y la segunda a inicio de floración. El fertilizante utilizado fue urea granulada (46% N) y la dosis de aplicación varió según el tratamiento correspondiente.

### 5.2.3. Datos recolectados

Durante el desarrollo del ciclo productivo se llevó a cabo el registro de diferentes variables morfofisiológicas: número de hojas visibles a inicio de panojamiento (**HIP**); número máximo

de hojas (**MH**); número máximo de nudos (**MN**); número máximo de ramificaciones (**MR**); altura a cosecha (**AC**); longitud de panoja (**LP**); diámetro del tallo (**ΦT**); número de hojas a cosecha (**HC**); número de ramificaciones a cosecha (**RC**); área foliar a cosecha (**AFC**); peso seco de tallo (**PSt**); peso seco de panoja (**PSp**); peso seco de hojas (**PSH**); peso seco de granos por panoja (**PSgp**); peso de mil granos (**P1000**); peso seco de granos por unidad experimental (**PSgue**); densidad de plantas a cosecha (**Dptc**); y porcentaje de plantas enfermas (**%Pe**) según la metodología detallada en el capítulo 2 de Materiales y Métodos.

Una vez obtenidos los valores de las variables detalladas anteriormente se procedió al cálculo de los siguientes indicadores: biomasa aérea de planta (**BApt**); peso seco de la estructura floral (**PSi**); número de granos por panoja (**Ngp**); rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico (**Re**) expresado como  $\text{Kg ha}^{-1}$ ; densidad de plantas por hectárea (**Dptc ha<sup>-1</sup>**); biomasa aérea por hectárea o rendimiento biológico (**Rb**) expresado en  $\text{Kg ha}^{-1}$ ; e índice de Cosecha (**IC**).

A su vez, durante el desarrollo del ciclo productivo en cada subparcela se identificaron según lo descrito en el capítulo 4 diferentes estadios fenológicos tales como: días a emergencia (**E**); días a inicio de panojamiento (**IP**) y al 100% del mismo (**100%P**); días a inicio de antesis (**IA**) y al 100% de antesis (**100% A**); días a grano lechoso (**GL**); días a grano pastoso (**GP**); madurez fisiológica (**M**).

#### 5.2.4. Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos se elaboraron tablas que fueron analizadas por medio del programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). En algunas variables (LP, Rb, Re) el test de ANOVA detectó interacción con los años, sin embargo, la magnitud de la misma fue despreciable ( $\text{Eta}^2 < 1\%$ ).  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o

explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006). Esto permitió aplicar modelos de ajustes a las dosis de fertilización en promedio para ambos años. Se optó por el modelo cuadrático, el cual ajustó en la mayoría de las variables (MH, MR, AC, LP,  $\Phi$ T, HC, RC, AFC, Rb, Dptc, PSt, PSp, PSi, PSh, BApt, Re, PSgp, P1000, Ngp) con altos porcentajes de explicación ( $R^2$  80 -95%) respecto de las fuentes de variación en juego. Cuando el modelo cuadrático no ajustó se aplicaron comparaciones de a pares (DMS) al 5% con los promedios de ambos años.

El hecho de que el modelo sea cuadrático permitió obtener el valor teórico de máxima respuesta ( $Y_{\max}$ ) que alcanzaría la variable y su correspondiente dosis de fertilización máxima ( $X_{\max}$ ). Sin embargo, la derivada en el sector de la curva donde se alcanza este valor es pequeña por lo tanto, se optó por averiguar la respuesta de la dosis anterior ( $Y_{DA}$ ) y cuánto representaba en porcentaje respecto de la respuesta máxima (% RM) donde:

$$\% \text{ RM} = \frac{Y_{DA}}{Y_{\max}} \times 100$$

En lo que respecta a la fenología del cultivo los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA). El test de ANOVA se aplicó primeramente a la variable días a madurez del cultivo, dado que la misma representa la totalidad del ciclo productivo de la planta, y se realizó la comparación de medias mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años (Tabla 5.7). A continuación, el ciclo de crecimiento del cultivo se dividió en 6 periodos (E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de anthesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; y M: madurez) que fueron analizados mediante el test de ANOVA. En las variables GP y M este test, detectó interacción con los años, sin embargo, la magnitud de la misma fue despreciable ( $\text{Eta}^2 < 1\%$ ), lo cual no invalidó el efecto de las fechas de siembra.  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales,

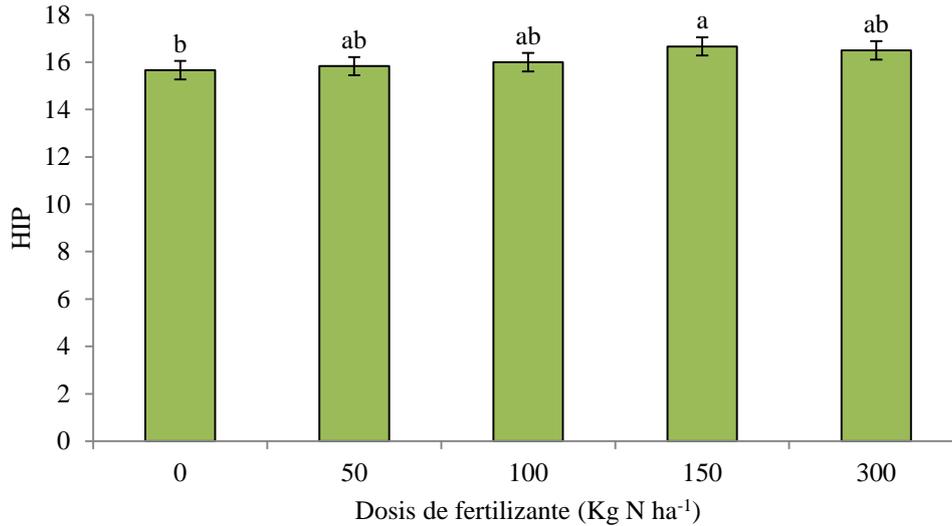
interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006). Las comparaciones de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008).

### 5.3. Resultados

#### 5.3.1. Variables morfofisiológicas

En todas las variables analizadas en este ensayo, con excepción de en %Pe, se observó una tendencia a incrementar los valores de las mismas conforme se incrementó la dosis de fertilización. En aquellas variables donde la dosis de fertilización máxima superó los 300 Kg N ha<sup>-1</sup> no se calculó  $Y_{max}$  pues no hay evidencias de que el comportamiento con dosis superiores a los 300 Kg N ha<sup>-1</sup> sea explicado por el modelo cuadrático. Cuando se presentaron estas circunstancias el %RM se calculó como la respuesta de la dosis 150 Kg N ha<sup>-1</sup> respecto de la dosis 300 Kg N ha<sup>-1</sup>. Para el caso de HIP, MN, IC y %Pe no se observó un comportamiento cuadrático y se procedió a realizar comparaciones de a pares (DMS) con el promedio de ambos años.

HIP mostró diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) asociadas a las dosis de fertilización evaluadas. Se observó una tendencia a incrementar el número de HIP conforme aumentó la dosis de fertilización, aunque, la magnitud (1 hoja) de estas diferencias sería despreciable agronómicamente (Figura 5.1).



**Figura 5.1.** Comportamiento promedio de hojas visibles a inicio de panojamiento para los ciclos productivos estudiados según las diferentes dosis de fertilización evaluadas. HIP: número de hojas visibles a inicio de panojamiento. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

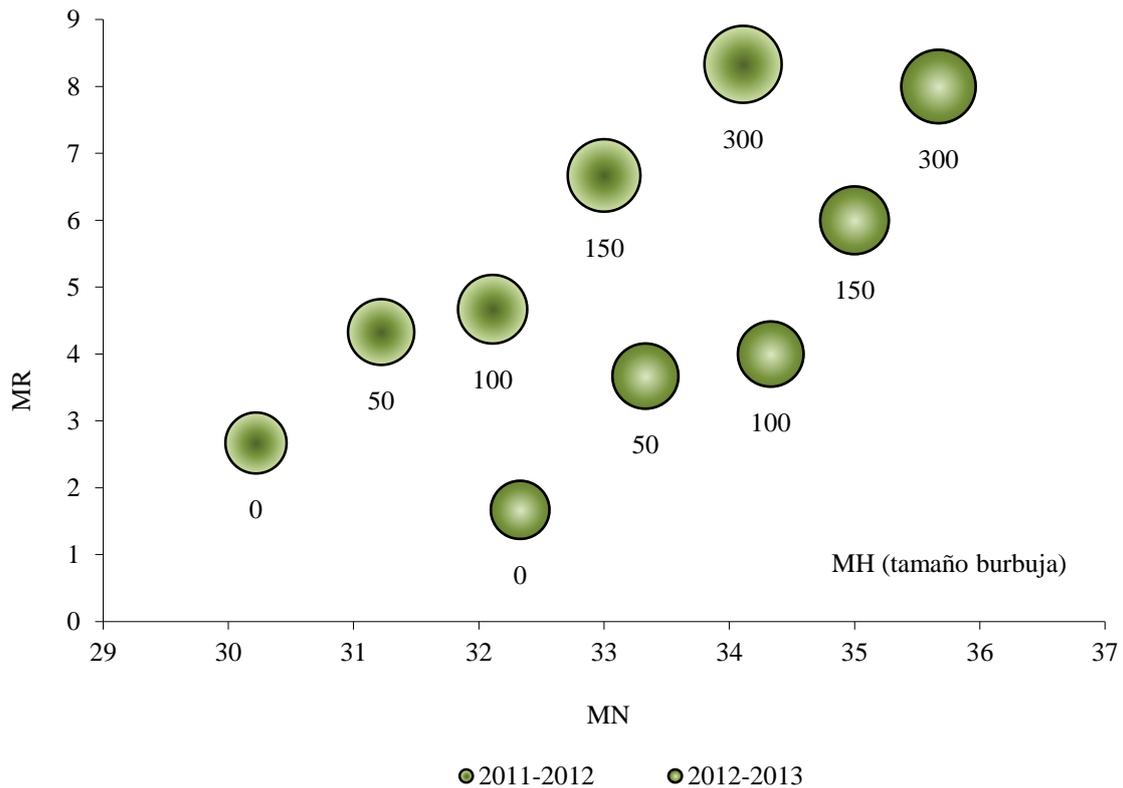
En relación a la estructura de la planta las variables MN, MH, MR mostraron una tendencia a incrementar conforme aumentó la dosis de fertilización (Tabla 5.2).

**Tabla 5.2.** Máximo número de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.

| Variable | Dosis de Fertilización |       |       |      |       | R <sup>2</sup> | X <sub>max</sub> | Y <sub>max</sub> | DA  | %RM |
|----------|------------------------|-------|-------|------|-------|----------------|------------------|------------------|-----|-----|
|          | 0                      | 50    | 100   | 150  | 300   |                |                  |                  |     |     |
| MH       | 32                     | 35,16 | 35,83 | 37,5 | 40,17 | 81             | > 300            | 40,34            | 150 | 93  |
| MN       | 31,26                  | 32,28 | 33,22 | 34   | 34,89 | 43*            | 306              | 34,9             | 150 | 97  |
| MR       | 2,17                   | 4,00  | 4,33  | 6,33 | 8,16  | 90             | > 300            | 8,81             | 150 | 78  |

MH: máximo de hojas; MN: máximo de nudos; MR: máximo de ramificaciones; R<sup>2</sup>: % de explicación del modelo cuadrático; \*: existió un componente debido a los años; X<sub>max</sub>: dosis de fertilizante máxima; Y<sub>max</sub>: respuesta máxima; DA: dosis anterior al máximo teórico; %RM: % respecto de la respuesta máxima (YDA respecto de Y<sub>max</sub> o Y300).

En el ciclo 2012-2013 se detectó mayor MN que en el año 2011-2012, en contraposición a lo observado en el MR que fue mayor en el ciclo 2011-2012 y ligeramente mayor el MH (Figura 5.2).



**Figura 5.2.** Esquema del comportamiento del máximo nudos, máximo de hojas, máximo de ramificaciones durante los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013 para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. MH: máximo de hojas; MN: máximo de nudos; MR: máximo de ramificaciones.

Las variables registradas a cosecha mostraron una tendencia a incrementar conforme aumentó la dosis de fertilización (Tablas 5.3 y 5.4). Es interesante destacar que el AF es la suma del área de hojas y ramificaciones. El aporte de estas últimas fue menor al 10% del total de AF registrado.

**Tabla 5.3.** Altura de la planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.

| Variable | Dosis de fertilización |        |        |        |        | R <sup>2</sup> | X <sub>max</sub> | Y <sub>max</sub> | DA  | %RM |
|----------|------------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|------------------|------------------|-----|-----|
|          | 0                      | 50     | 100    | 150    | 300    |                |                  |                  |     |     |
| AC (cm)  | 149,50                 | 162,00 | 174,00 | 176,00 | 182,00 | 97             | 250              | 183              | 150 | 96  |
| LP (cm)  | 26,83                  | 35,50  | 44,05  | 49,00  | 52,89  | 97             | 258              | 53,9             | 150 | 91  |
| ΦT (cm)  | 1,50                   | 1,56   | 2,00   | 2,2    | 2,32   | 83             | 278              | 2,34             | 150 | 94  |

AC: altura de planta a cosecha (cm), LP: longitud de panoja (cm); ΦT; diámetro del tallo a cosecha (cm); R<sup>2</sup>: % de explicación del modelo cuadrático; X<sub>max</sub>: dosis de fertilizante máxima; Y<sub>max</sub>: respuesta máxima; DA: dosis anterior al máximo teórico; %RM: % respecto de la respuesta máxima (Y<sub>DA</sub> respecto de Y<sub>max</sub> o Y<sub>300</sub>).

**Tabla 5.4.** Número de hojas, ramificaciones y área foliar a cosecha para las diferentes dosis de fertilización ensayadas.

| Variable               | Dosis de Fertilización |         |         |         |         | R <sup>2</sup> | X <sub>max</sub> | Y <sub>max</sub> | DA  | %RM |
|------------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|------------------|------------------|-----|-----|
|                        | 0                      | 50      | 100     | 150     | 300     |                |                  |                  |     |     |
| HC                     | 23,17                  | 26,67   | 30,84   | 34,17   | 36,17   | 82             | 272              | 36,42            | 150 | 94  |
| RC                     | 1,50                   | 3,00    | 3,16    | 5,67    | 7,67    | 91             | > 300            | 10,16            | 150 | 74  |
| AFC (cm <sup>2</sup> ) | 1003,77                | 1193,13 | 1474,35 | 1733,42 | 2086,42 | 85             | > 300            | 2186             | 150 | 83  |

HC: número de hojas a cosecha; RC: número de ramificaciones a cosecha; AFC: área foliar a cosecha (cm<sup>2</sup>); R<sup>2</sup>: % de explicación del modelo cuadrático; X<sub>max</sub>: dosis de fertilizante máxima; Y<sub>max</sub>: respuesta máxima; DA: dosis anterior al máximo teórico; %RM: % respecto de la respuesta máxima (Y<sub>DA</sub> respecto de Y<sub>max</sub> o Y<sub>300</sub>).

### 5.3.2. Rendimiento y sus componentes

El rendimiento biológico y sus componentes mostraron una respuesta positiva a la aplicación de fertilizante (Tabla 5.5)

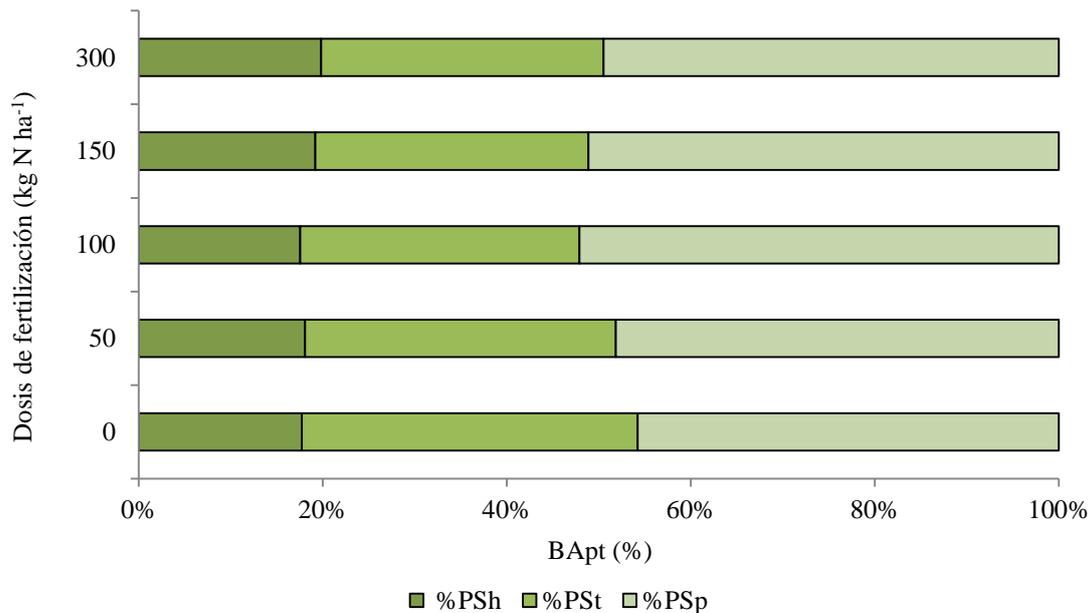
Respecto al Dptc se observó una menor pérdida de plantas conforme se incrementó la dosis de fertilización. Sin embargo, no se detectaron diferencias estadísticas significativas a partir de la dosis de 100 Kg N ha<sup>-1</sup>

**Tabla 5.5.** Respuesta del rendimiento biológico y de sus componentes frente a las diferentes dosis de fertilización ensayadas.

| Variable                     | Dosis de Fertilización |          |          |          |          | R <sup>2</sup> | X <sub>max</sub> | Y <sub>max</sub> | DA  | %RM |
|------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------|------------------|------------------|-----|-----|
|                              | 0                      | 50       | 100      | 150      | 300      |                |                  |                  |     |     |
| Rb<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | 7802,45                | 12074,05 | 18207,09 | 20930,83 | 21805,88 | 96             | 238              | 22945            | 150 | 91  |
| Dptc                         | 76758,77               | 79859,69 | 90248,30 | 90737,13 | 90889,23 | 85             | 222              | 93106            | 150 | 97  |
| PSt (g)                      | 20,89                  | 29,17    | 41,39    | 44,36    | 51,08    | 95             | 269              | 51,44            | 150 | 86  |
| PSp (g)                      | 26,24                  | 41,65    | 71,07    | 76,46    | 82,17    | 96             | 238              | 86,50            | 150 | 88  |
| PSi (g)                      | 6,55                   | 13,06    | 33,08    | 34,94    | 36,24    | 90             | 228              | 39,91            | 150 | 88  |
| PSh (g)                      | 10,18                  | 15,66    | 23,99    | 28,8     | 33       | 93             | 277              | 33,30            | 150 | 86  |
| BApt (g)                     | 57,30                  | 86,48    | 136,45   | 149,62   | 166,25   | 97             | 252              | 171              | 150 | 87  |

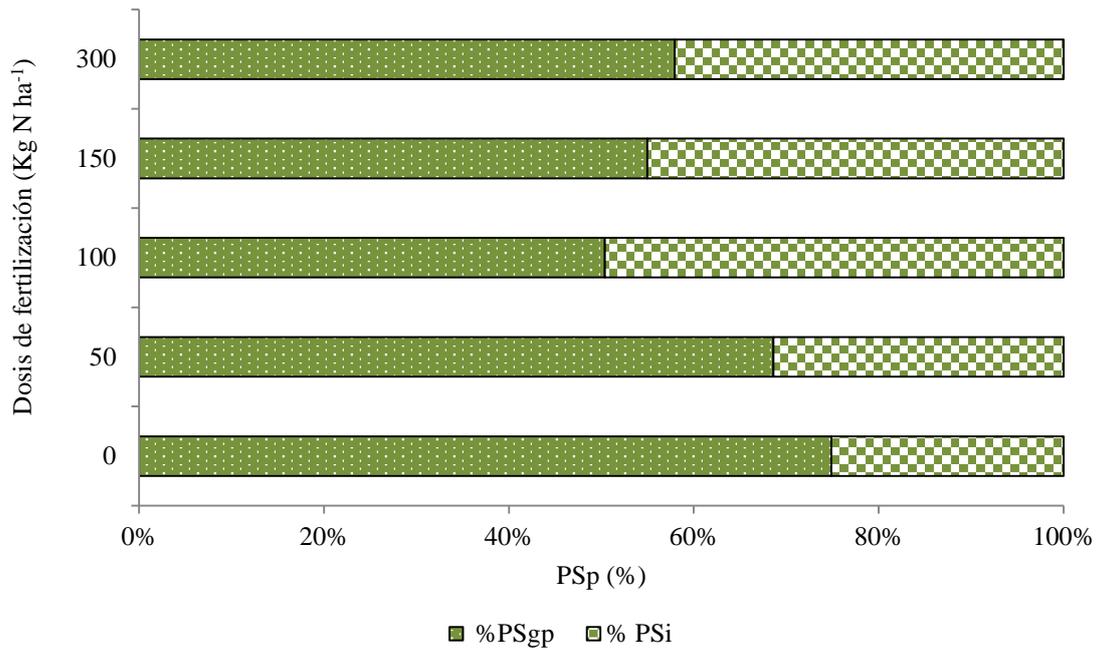
Rb: Rendimiento biológico (kg ha<sup>-1</sup>) ; Dptc: densidad de plantas a cosecha; PSt: peso seco de tallo (g); PSp: peso seco de panoja; PSi: peso seco de estructura floral (g); PSh: peso seco de hojas (g); BApt: biomasa aérea por planta(g); R<sup>2</sup>: % de explicación del modelo cuadrático; X<sub>max</sub>: dosis de fertilizante máxima; Y<sub>max</sub>: respuesta máxima; DA: dosis anterior al máximo teórico; %RM: % respecto de la respuesta máxima (Y<sub>DA</sub> respecto de Y<sub>max</sub> o Y<sub>300</sub>).

En el caso particular de BApt se observó un incremento en función de las dosis de fertilización, el cual podría ser explicado por el aumento en el % Psp (Figura 5.6).



**Figura 5.3.** Comportamiento de la biomasa aérea de planta y sus componentes bajo las diferentes dosis de fertilización ensayadas. BApt: biomasa aérea por planta (g); PSh: peso seco de hojas (g); PSt: peso seco de tallo (g); PSp: peso seco de panoja (g).

Un análisis más detallado del PSp mostró que el PSgp es el componente que más representa a esta variable sin embargo, el comportamiento varía según la dosis de fertilización utilizada.



**Figura 5.4.** Comportamiento del peso seco de granos por panoja y del Peso seco de estructura floral como porcentaje del peso seco de panoja bajo las diferentes dosis de fertilización ensayadas. PSp: peso seco de panoja (g); PSgp: peso seco de granos por panoja (g); PSi: peso seco de inflorescencia (g).

Con bajas dosis de fertilización la proporción de PSgp fue mayor sin embargo, en los 100 kg N ha<sup>-1</sup> las proporciones se equiparan y a partir de los 150 kg N ha<sup>-1</sup> se incrementó en forma gradual conforme se aumentó la dosis fertilización utilizada (Figura 5.4).

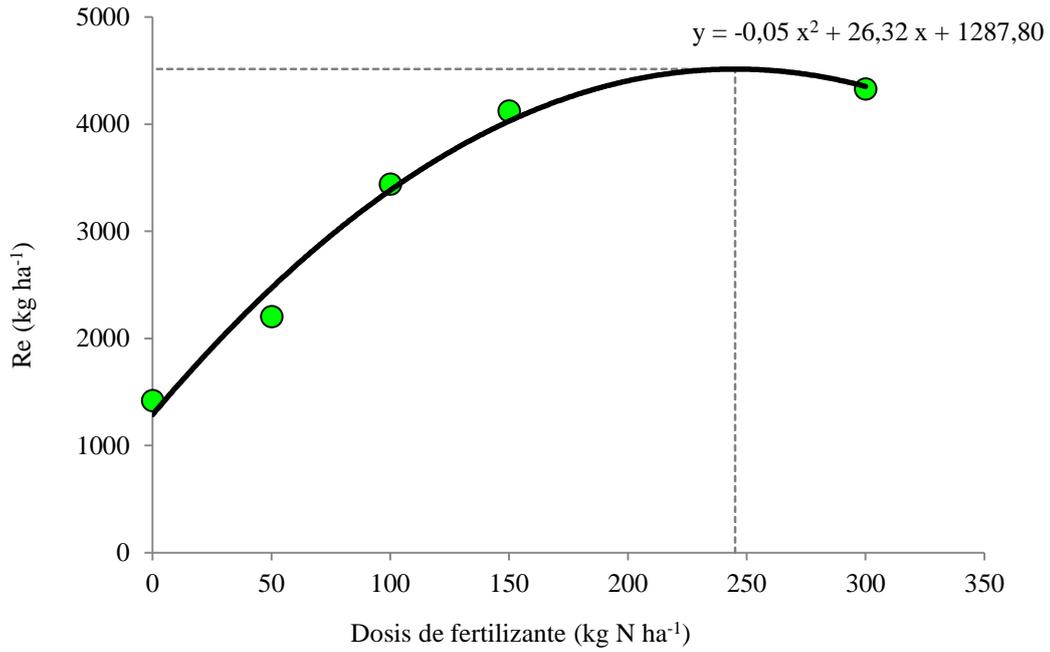
El rendimiento económico y sus componentes mostraron una respuesta positiva a la aplicación de fertilizante (Tabla 5.6).

**Tabla 5.6.** Respuesta del rendimiento económico y de sus componentes frente a las diferentes dosis de fertilización ensayadas.

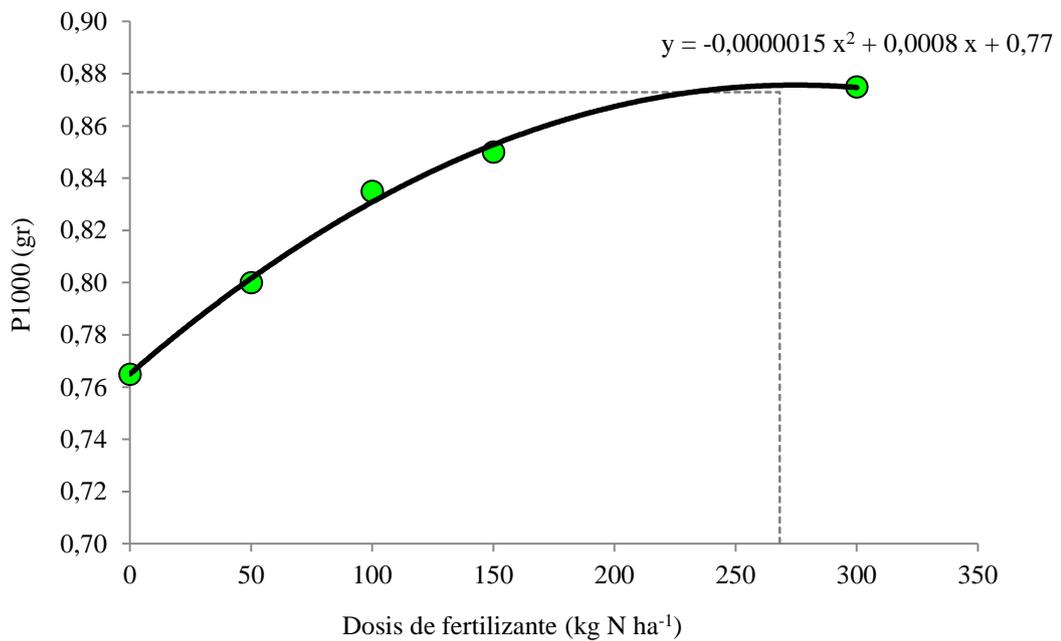
| Variable                     | Dosis de Fertilización |          |          |          |          | R <sup>2</sup> | X <sub>max</sub> | Y <sub>max</sub> | DA  | %RM |
|------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------|------------------|------------------|-----|-----|
|                              | 0                      | 50       | 100      | 150      | 300      |                |                  |                  |     |     |
| Re<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | 1421,40                | 2206,00  | 3441,29  | 4123,02  | 4329,46  | 97             | 245              | 4514,00          | 150 | 91  |
| PSgp (g)                     | 19,69                  | 28,60    | 35,81    | 42,04    | 47,27    | 96             | 276              | 47,53            | 150 | 88  |
| P1000 (g)                    | 0,77                   | 0,80     | 0,84     | 0,85     | 0,88     | 96             | 268              | 0,87             | 150 | 97  |
| Ngp (g)                      | 25647,95               | 35903,00 | 42940,07 | 49275,53 | 54235,48 | 95             | 267              | 54675,84         | 150 | 90  |

Re: rendimiento económico (kg ha<sup>-1</sup>); PSgp: peso seco de granos por panoja (g); P1000: peso de mil granos (g); Ngp: número de granos por panoja; R<sup>2</sup>: % de explicación del modelo cuadrático; X<sub>max</sub>: dosis de fertilizante máxima; Y<sub>max</sub>: respuesta máxima; DA: dosis anterior al máximo teórico; %RM: % respecto de la respuesta máxima (Y<sub>DA</sub> respecto de Y<sub>max</sub> o Y<sub>300</sub>).

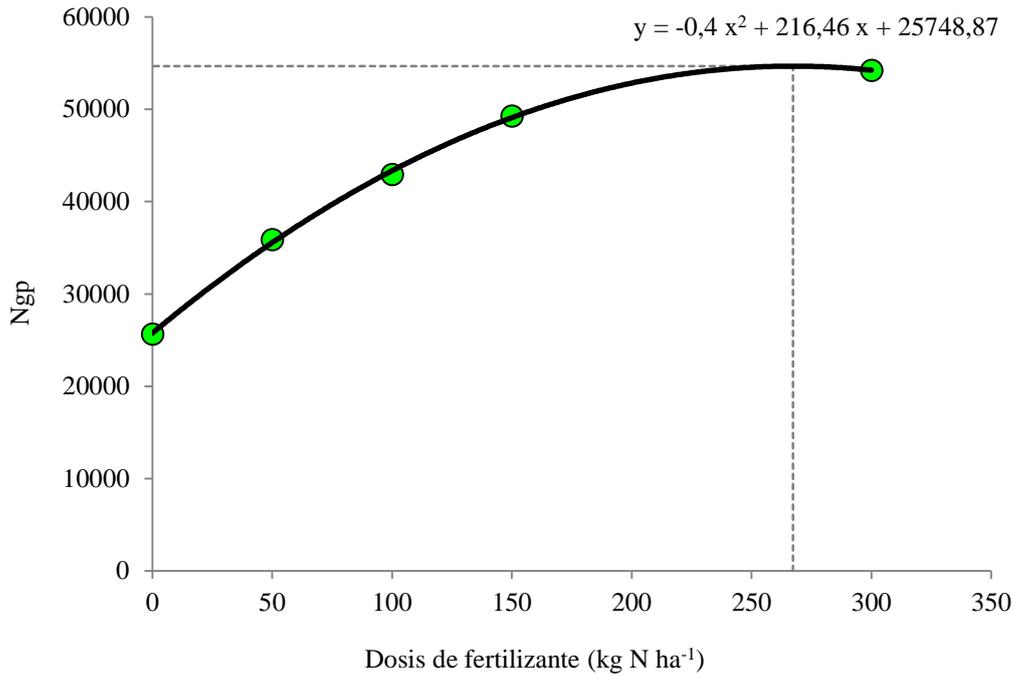
El comportamiento de las variables asociadas al rendimiento económico y sus componentes mostró un aumento conforme se incrementó la dosis de fertilizante aplicada. A pesar de ello, los máximos rendimientos se alcanzarían con dosis inferiores a la máxima (300 kg N ha<sup>-1</sup>) utilizada (Figuras 5.5 a 5.8).



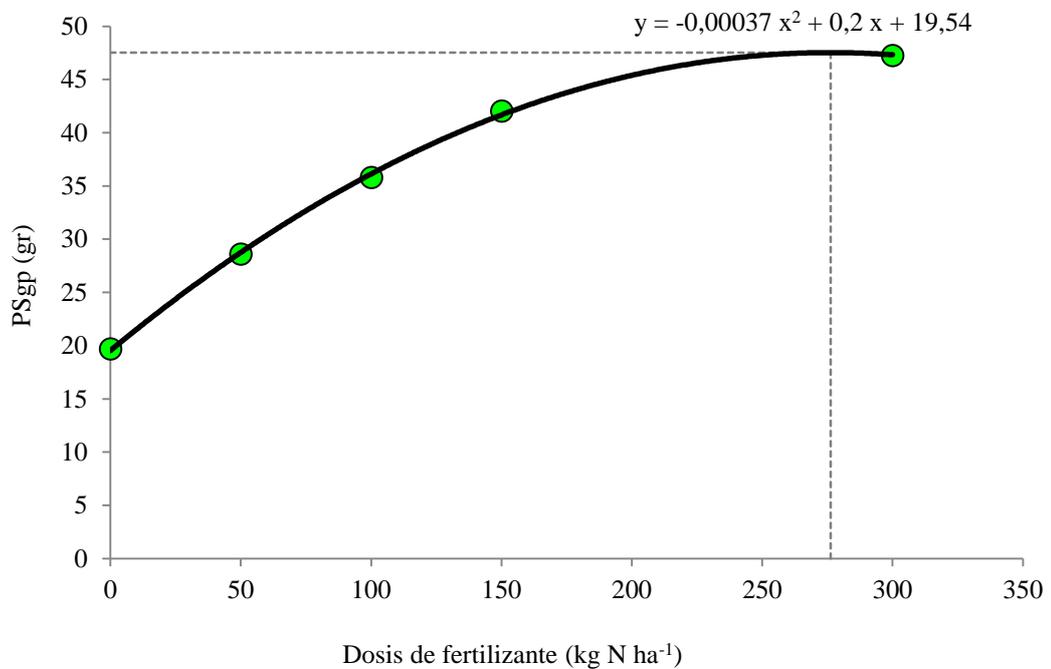
**Figura 5.5.** Comportamiento del rendimiento económico para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. Barras de error dentro del rango del símbolo.



**Figura 5.6.** Comportamiento del peso de mil granos para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. Barras de error dentro del rango del símbolo.

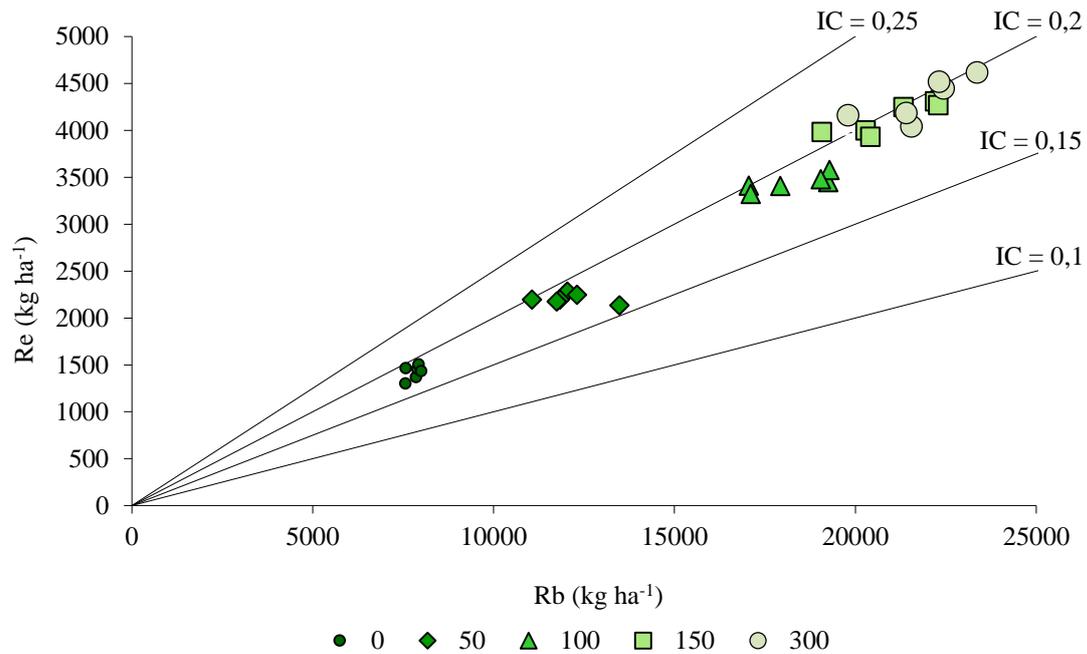


**Figura 5.7.** Comportamiento del número de granos por panoja para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. Barras de error dentro del rango del símbolo.



**Figura 5.8.** Comportamiento del peso seco de granos por panoja para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. Barras de error dentro del rango del símbolo.

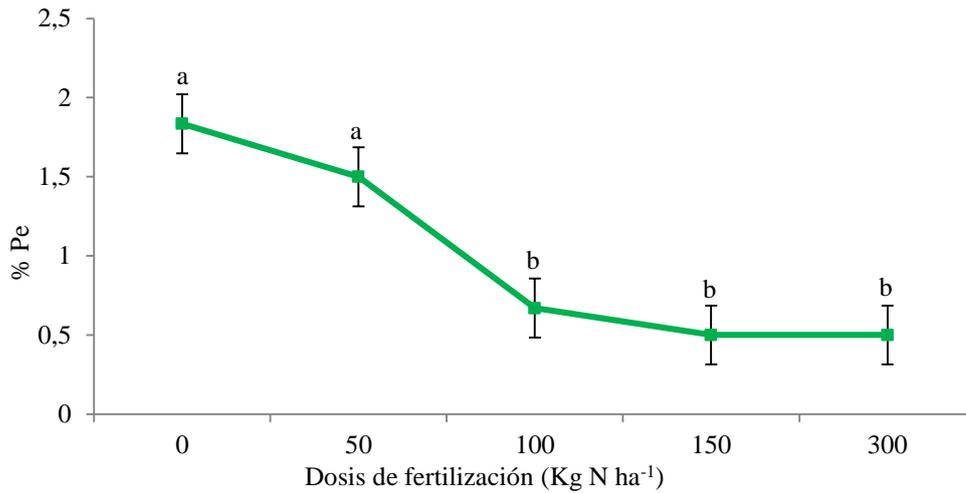
El comportamiento del IC mostró una tendencia a incrementar conforme se aumentó la dosis de fertilización ensayada (Figura 5.9). Si se representan los valores obtenidos sobre un gráfico de isolíneas de IC se observa que las nubes de puntos para las dosis de fertilización más elevadas (150-300) se encuentran alrededor de 0,20.



**Figura 5.9.** Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes dosis de fertilización ensayadas. IC: índice de cosecha; Re: rendimiento económico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Rb: rendimiento biológico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); Dosis de fertilización (0, 50, 100, 150, 300) expresadas en  $\text{Kg N ha}^{-1}$ .

### 5.3.3. Incidencia de enfermedad

En relación al %Pe se detectaron diferencias estadísticas significativas entre las distintas dosis de fertilización evaluadas. Se observó que la incidencia de “mancha negra del tallo” se vio reducida en las tres últimas dosis respecto de las restantes (Figura 5.10).



**Figura 5.10.** Incidencia de plantas enfermas con *Macrophoma sp* según las diferentes dosis de fertilización ensayadas. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

#### 5.3.4. Fenología del cultivo

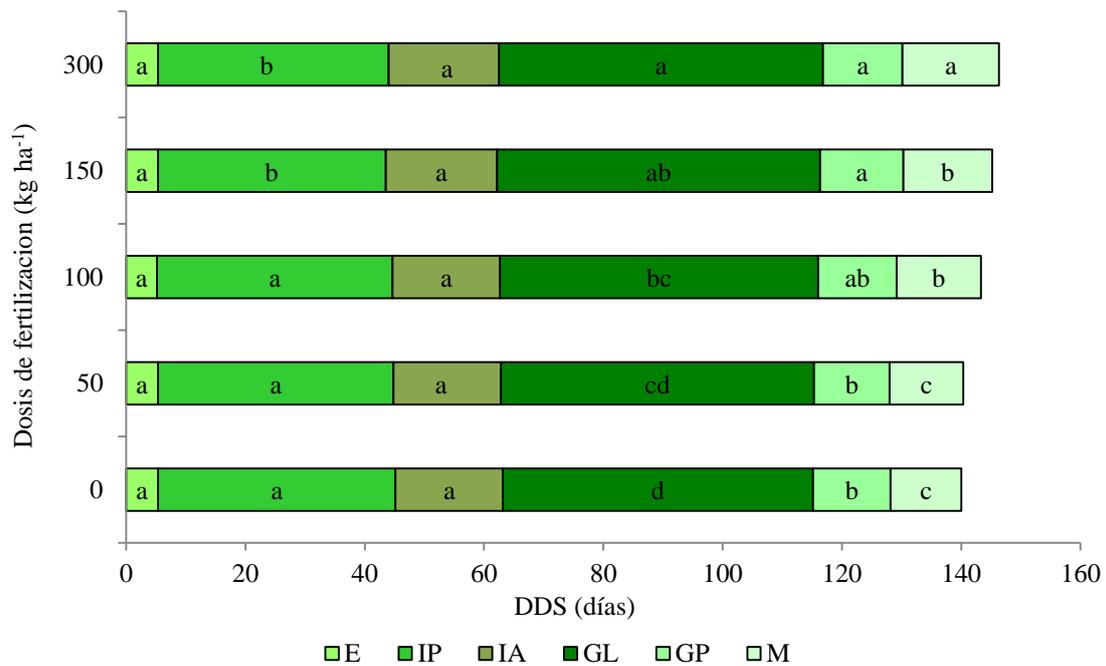
En relación a la fenología del cultivo en función de las diferentes dosis de fertilización utilizadas se observó que los estadios de E, IP, 100% P e IA no mostraron un patrón claro de tendencia. El rango de valores entre los extremos de estas variables fue como máximo de un día y medio entre las distintas dosis de fertilizante, tiempo que podría considerarse agrónomicamente despreciable. (Tabla 5.7)

**Tabla 5.7.** Valores promedios en días para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 para las dosis de fertilización ensayadas.

| Tratamiento | E    | IP    | 100% P | IA    | 100% A | GL     | GP     | M        |
|-------------|------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|----------|
| 0           | 5,33 | 45,17 | 95,5   | 63,17 | 108,50 | 115,17 | 128,17 | 140,00 d |
| 50          | 5,33 | 44,83 | 95,17  | 62,83 | 107,83 | 115,33 | 128,00 | 140,33 d |
| 100         | 5,17 | 44,67 | 95,17  | 62,67 | 107,33 | 116,00 | 129,17 | 143,33 c |
| 150         | 5,33 | 43,50 | 95,50  | 62,17 | 106,17 | 116,33 | 130,33 | 145,17 b |
| 300         | 5,33 | 44,00 | 96,00  | 62,50 | 106,83 | 116,83 | 130,17 | 146,33 a |

E: emergencia; IP: inicio de panojamiento, IA: inicio de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

A partir de GL se hacen más evidentes las diferencias en la longitud de los estadios según la dosis de fertilización utilizada, y las mismas se mantienen hasta final de ciclo observándose una tendencia a aumentar el número de días transcurridos desde la siembra a cosecha conforme se incrementó la dosis de fertilización (Figura 5.11).



**Figura 5.11:** Tiempo cronológico de cada estadio fenológico del cultivo para las diferentes dosis de fertilizante ensayadas. E: emergencia; IP: inicio de panojamiento, IA: inicio de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica. Valores dentro de un mismo estadio seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En relación a los GDD a madurez se detectaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) entre los distintos tratamientos con una tendencia de los mismos a incrementar conforme se aumentó la dosis de fertilización. Los valores obtenidos fueron: 1678 GDD, 1680 GDD, 1700 GDD, 1714 GDD y 1722 GDD para 0 Kg N ha<sup>-1</sup>, 50 Kg N ha<sup>-1</sup>, 100 Kg N ha<sup>-1</sup>, 150 Kg N ha<sup>-1</sup> y 300 Kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente.

#### 5.4. Discusión

Altos porcentajes de germinación y una emergencia homogénea de plántulas son condiciones necesarias para lograr una buena implantación del cultivo e incluso altos rendimientos. En este sentido factores tales como luz, humedad y temperatura inciden en el proceso de germinación y emergencia. En estos ensayos la temperatura del suelo se mantuvo por encima de los 20 °C lo cual permitió lograr un buen stand de plantas. Esto concuerda con lo hallado por Webb *et al.* (1987) donde emergencias de campo satisfactorias serían logradas con temperaturas de suelo entre 18.5 °C (85% emergencia) y 24 °C (95% emergencia).

En relación al Re se apreció un aumento de esta variable conforme se incrementó la dosis de fertilización, este mismo comportamiento se observó en el P1000, Ngp y PSgp. El incremento en el rendimiento estuvo dado por el aumento manifestado en sus componentes y en menor medida por el número de plantas por hectárea logrado al incrementar la dosis de fertilizante.

Si bien existen diferencias estadísticamente significativas en rendimiento entre 150 kg N ha<sup>-1</sup> y 300 kg N ha<sup>-1</sup>, estas diferencias representan aproximadamente una magnitud de 200 kg ha<sup>-1</sup>. La curva de ajuste de rendimiento recomienda una dosis de 245 kg N ha<sup>-1</sup> para lograr los máximos Re (4514 kg ha<sup>-1</sup>), es decir un incremento próximo a los 400 kg ha<sup>-1</sup> de grano respecto de la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>.

El modelo matemático de ajuste utilizado permitió estimar la dosis de fertilización a aplicar para lograr los máximos rendimientos, sin embargo, esta dosis podría variar según el contenido de N presente en el suelo. Una condición de suelo más pobre que la de este ensayo haría que la dosis de N considerada como máxima se vea incrementada. A su vez, se consideró importante evaluar si esta dosis de fertilización sería económicamente viable en relación a los rendimientos en grano obtenidos. Para ello se analizó la relación insumo-producto (fertilizante-grano) para las condiciones del ensayo (Anexo). De los resultados

obtenidos se observó que la maximización de los beneficios varía según el precio del insumo y del producto. En el momento en que se llevaron a cabo los ensayos el fertilizante (urea) presentaba un valor de 6,50 \$ kg<sup>-1</sup>. En relación al precio del grano se dificultó establecer un valor de venta, dado que no existe un mercado de referencia. A pesar de ello la empresa Sturla, productora y compradora de amaranto a pequeños productores, en comunicación personal mencionó un valor de 15,00 \$ kg<sup>-1</sup> de grano. Los resultados obtenidos en este análisis manifestaron que para este precio de producto la dosis que permitiría maximizar los beneficios sería de 241 kg urea ha<sup>-1</sup>. Este valor se encuentra muy próximo al de maximización los rendimientos (245 kg). Del mismo modo se analizó el comportamiento de la relación insumo-producto a valores de precio de grano menores (8,00 y 2,00 \$ kg<sup>-1</sup>) dando como resultado dosis de fertilizante de 238 y 215 kg de urea ha<sup>-1</sup> respectivamente para maximizar el beneficio (Anexo).

El nitrógeno promueve el crecimiento vegetativo, tanto en el número y tamaño de las hojas como en altura de la planta (FAO, 2002). Por ello, en este ensayo el incremento en BApt podría atribuirse a la mayor radiación interceptada producto del mayor tamaño y número de hojas por efecto de la fertilización. Sin embargo, el mayor aporte porcentual de esta variable lo representa PSp con valores mayores al 40%. El incremento de PSp podría estar relacionado con el comportamiento de las variables Ngp, Lp y en menor grado con P1000, las cuales mostraron similar comportamiento.

Por efecto de la fertilización nitrogenada se produjo un aumento en PSi y consecuentemente en el peso y número de granos que se desarrollaron. Esto podría interpretarse como una respuesta de la planta donde frente a altas dosis de fertilizante incrementa notoriamente Ngp y reduce la relación entre PSI/PSgp. Podría suponerse que la fertilización incrementó el potencial de la inflorescencia para formar grano, sin embargo, una

condición interna de la planta determina el número de flores que formará grano y cuantas de ellas abortarán.

En función del análisis realizado anteriormente, en caso de utilizar la dosis de fertilización recomendada para lograr los mayores Re ( $245 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) se estaría más próximo a la dosis que permitiría los mayores valores de BApt ( $252 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y se superaría la dosis necesaria para lograr los mayores Rb ( $238 \text{ kg N ha}^{-1}$ ).

En la mayoría de las variables morfofisiológicas se observó un efecto positivo de la fertilización. La proporción de recursos contenidos en las estructuras reproductivas suele ser dependiente del tamaño de la planta, sin embargo, esta asignación de recursos puede aumentar, disminuir o permanecer constante en relación a la variación de tamaño dentro de una especie y a la influencia del ambiente (Kawano y Miyake, 1983; Hara *et al.*, 1988; Wagner, 1989; Bazzaz y Ackerly, 1992; Reekie, 1998; Welham y Setter, 1998). En este trabajo se observó cómo los componentes de la biomasa de planta influyeron en la asignación de recursos a la estructura floral en respuesta al aumento de N en el suelo. Así las variables número máximo de hojas (MH), ramificaciones (MR) y longitud de la panoja (LP) aumentaron conforme se incrementó la dosis de fertilización.

En cuanto al AFC se observó su incremento conforme se aumentó la dosis de fertilización. Este comportamiento podría relacionarse con el incremento observado en el MH y MR conforme se aumentó la dosis de fertilización. Este efecto se vio reflejado a su vez en mayor HC y RC con incidencia directa sobre AFC. Este incremento de AFC y HC podría estar relacionado con el incremento observado en el PSh. Claramente se evidenció que el nitrógeno promueve el crecimiento vegetativo, tanto en número y tamaño de las hojas como en altura de la planta (Tisdale, 1990 citado por Olaniyi, 2008). Por ello, el incremento en BApt podría

atribuirse a la mayor radiación interceptada producto del mayor desarrollo y número de hojas por efecto de la fertilización (Escalante, 1995 citado por Díaz Ortega *et al.*, 2004).

En un ensayo de fertilización de amaranto tipo azteca con dosis de 0, 100 y 200 kg N ha<sup>-1</sup> se hallaron incrementos en las variables: biomasa total, rendimiento en grano, largo de panoja, número de panojas por planta y número de semillas por m<sup>2</sup>. A pesar de ello, y a diferencia de lo observado en este ensayo, las variables IC y P1000 no presentaron diferencias entre los tratamientos (Díaz Ortega *et al.*, 2004).

Un trabajo similar describe incrementos de la producción de biomasa total y de rendimiento en grano con el aumento de la dosis de fertilización nitrogenada hasta un 43% con 180 kg N ha<sup>-1</sup>. Según el autor estas diferencias podrían atribuirse al mayor número de granos por planta, ya que el peso de granos y el número de plantas por hectárea se mantuvieron constantes (Myers, 1998). Otra investigación menciona incrementos de rendimiento en grano del 40% con dosis de N de 120 kg ha<sup>-1</sup> respecto del tratamiento sin fertilización (Erley *et al.*, 2005). En el mismo sentido, un trabajo señala que tanto el peso de la semilla de este cultivo como la calidad de la misma se ven influenciadas positivamente por la aplicación de N conforme se incrementa la dosis de fertilización nitrogenada (Markus, 1990; Pospisil *et al.*, 2006; Olaniyi *et al.*, 2008). En esta tesis el incremento fue mayor al 100% para la dosis de 100 kg N ha<sup>-1</sup> respecto del control.

La AC aumentó conforme se incrementó la dosis de fertilización probablemente debido al aumento del número de nudos. Sin embargo, la magnitud de este aumento no fue de gran importancia, lo que indicaría que el incremento en altura está determinado por un aumento en el número de nudos y posiblemente en mayor medida por el incremento de la longitud de los entrenudos como consecuencia de la aplicación de fertilizante. El aumento de AC a su vez

podría relacionarse con la mayor densidad de plantas observada al incrementar la dosis de fertilización, la cual podría generar competencia intraespecífica por el factor luz.

En este sentido se puede mencionar un ensayo de 3 cultivares de amaranto con 3 dosis de fertilización nitrogenada (0, 80 y 160 kg N ha<sup>-1</sup>) en el cual se mostró que al incrementar las dosis de N la altura de planta, el rendimiento en grano y el porcentaje de acame fueron significativamente mayores mientras que la incidencia de plantas enfermas fue menor. Sin embargo, no se hallaron diferencias en número de plantas por m<sup>2</sup>, circunferencia de tallo, ni longitud de panoja (Arellano Vázquez y Galicia Franco, 2007). Del mismo modo un ensayo con 2 variedades de amaranto y 5 dosis de fertilización (0, 15, 30, 45 y 60 Kg N ha<sup>-1</sup>) halló un incremento en altura de planta, número de hojas y PSt conforme se incrementó la dosis de fertilización, sin encontrar diferencias entre las 2 últimas dosis evaluadas (Olaniyi *et al.*, 2008). Otros autores hacen referencia a la respuesta positiva de la altura de planta y de la biomasa aérea a la fertilización nitrogenada (Myers, 1998; Alonge *et al.*, 2007; Ainika *et al.*, 2011).

El  $\Phi T$  en los ensayos de esta tesis se incrementó hasta dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>, no hallándose diferencias con la dosis de 300 kg N ha<sup>-1</sup>, posiblemente este incremento se relacione a la mayor LP y PSp observado.

El IC respondió positivamente a la fertilización nitrogenada pero no mostró diferencias estadísticamente significativas entre las dosis más elevadas (150 kg N ha<sup>-1</sup> y 300 kg N ha<sup>-1</sup>) es decir, si bien los Re y Rb son mayores en la dosis de 300 kg N ha<sup>-1</sup> respecto a la dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup> esta magnitud no resulta suficiente para influenciar el IC. Este efecto podría deberse al comportamiento mencionado anteriormente en la asignación de recursos, los cuales pueden aumentar, disminuir o permanecer constantes en relación a la variación de

tamaño dentro de una especie y a la influencia del ambiente (Kawano y Miyake, 1983; Hara *et al.*, 1988; Wagner, 1989; Bazzaz y Ackerly, 1992; Reekie, 1998; Welham y Setter, 1998).

En contraste con los resultados antes mencionados y con los obtenidos en este ensayo otras investigaciones realizadas hallaron que el rendimiento de amaranto no mostró efectos significativos por el aumento de la dosis de fertilizante (Bressani *et al.*, 1987). En el mismo sentido cruza entre *A. hybridus* x *A. hypochondriacus* fertilizadas con dosis de 0, 60, 120 y 240 kg de N ha<sup>-1</sup> no mostraron diferencias en rendimiento, altura de planta e IC. Sin embargo, con la aplicación de 60 kg ha<sup>-1</sup> el peso de grano por planta fue mayor con respecto al de 0 kg ha<sup>-1</sup> (Markus, 1990).

En relación al % Pe se observó que a mayores dosis de fertilización la incidencia de *Macrophoma spp* se redujo, posiblemente debido a una menor susceptibilidad a enfermedades producto de un mayor desarrollo de la planta en general y un mejor estado nutricional de la misma. Algunos autores atribuyen el vuelco de plantas directamente a la incidencia de mancha del tallo, debido a que la misma afecta el tejido interno y lo debilita (Sánchez *et al.*, 1991). Según Arellano Vázquez y Galicia Franco la aplicación de fertilizante nitrogenado influye sobre el vigor del tallo y la tolerancia a enfermedades aun cuando la incidencia de la misma está íntimamente relacionada con la susceptibilidad del cultivar (Arellano y Galicia, 2007). Con base en lo anterior, se infiere que la disponibilidad de nitrógeno influyó sobre el vigor de tallo y la tolerancia a enfermedades.

El lapso entre una y otra fase del desarrollo es dependiente de las condiciones ambientales. Así por ejemplo, en maíz y girasol el crecimiento y la fenología responden significativamente a las condiciones ambientales y a las dosis de fertilización aplicadas observándose un incremento en el número de días entre los diferentes estadios de crecimiento, posiblemente debido al aumento del periodo vegetativo (Kho, 2000; Prasad *et al.*, 2002; De Varennes *et al.*,

2002; Moujiri y Arzani, 2003; Sadras, 2006; Bakht *et al.*, 2010, Jehan *et al.*, 2010; Hammad *et al.*, 2013). En este ensayo se apreciaron diferencias significativas entre tratamientos con una tendencia a aumentar la longitud del ciclo productivo en tiempo cronológico conforme se incrementó la dosis de fertilización aplicada, sin embargo, estas diferencias no superaron los 6 días. En relación a los GDD se halló una diferencia estadísticamente significativa de 44 GDD entre el control y la máxima dosis de fertilizante. Este pequeño incremento en la duración del ciclo podría ser de importancia dado que en la zona de estudio haría coincidir el inicio de precipitaciones de otoño con el momento de cosecha, situación que podría dificultar la misma debido al aumento del tiempo de secado del grano y pérdidas en el rendimiento. En un ensayo similar al de esta tesis se observó que la dosis de 180 kg N ha<sup>-1</sup> provocó un periodo vegetativo más prolongado con un retraso en la maduración del grano (Myers, 1998). Los resultados aquí obtenidos mostraron que las diferencias encontradas comienzan en el estadio de GL y se hacen más evidentes hacia el final del ciclo. A pesar de ello Díaz Ortega en un ensayo de fertilización con N no encontraron diferencias asociadas a los tratamientos (Díaz Ortega *et al.*, 2004).

Se puede hacer una comparación de este ensayo con la 2ª fecha de siembra del ensayo comparativo de estadios fenológicos realizado para el capítulo 4 de esta tesis. En ambos casos las fechas de siembra fueron similares y la dosis de fertilización para el ensayo mencionado fue de 90 kg urea ha<sup>-1</sup> mientras que la de este ensayo fue de 100 kg urea ha<sup>-1</sup>. De esta comparación surgen pequeñas diferencias en los estadios de 100% P, 100% A y GL donde en el ensayo de fertilización se requieren menos días para alcanzar estos estadios. En GP y madurez se observó un incremento en el número de días, comportamiento coincidente con los observado en el ensayo de fertilización.

Un ensayo realizado para evaluar la respuesta a diferentes dosis de nitrógeno en amaranto, mostró que dosis elevadas de este fertilizante tienen un efecto negativo al momento de

cosecha de grano dado que generan excesivas alturas de planta, incrementa el periodo de llenado de grano y retrasan la maduración del mismo (Myers, 1998). En este mismo sentido, un ensayo similar con dosis de nitrógeno de 80 y 160 kg N ha<sup>-1</sup> no halló diferencias en el número de días a inicio de floración ni en los días a floración media respecto de la dosis de fertilización utilizada (Arellano Vázquez y Galicia Franco, 2007).

Por otra parte un ensayo con tres densidades de siembra y tres dosis de fertilización nitrogenada realizado en amaranto no demostró cambios en la fenología del cultivo asociados a la fertilización o a la densidad de población (Díaz Ortega *et al.*, 2004).

## 5.5. Conclusiones

La fertilización es una práctica de manejo agronómico que aplicada al cultivo de amaranto bajo riego y en las condiciones de clima templado semidesértico de la Norpatagonia permite incrementar su rendimiento económico.

Así mismo, la fertilización reduce la incidencia de enfermedades e incrementa la supervivencia de plantas por hectárea que se reflejan en los crecientes rendimientos económicos y biológicos obtenidos.

La dosis de 300 kg N ha<sup>-1</sup> permite alcanzar en la mayoría de los casos los valores más altos de las variables estudiadas fundamentalmente de rendimiento económico y biológico. Sin embargo, sería importante evaluar diferentes dosis de fertilización intermedias entre 150 y 300 kg N ha<sup>-1</sup> que resulten económicamente viables en relación al costo de producción del cultivo para la zona.

A su vez, la tendencia a incrementar la longitud de ciclo productivo conforme se incrementó la dosis de fertilización es un dato a considerar dado que coincide con el inicio de la temporada de precipitaciones de la región de estudio, situación que puede producir dificultades en el proceso de cosecha.

## 6. DENSIDAD DE PLANTAS

---

### 6.1. Introducción

Para maximizar la producción es importante conocer cómo la densidad de plantas incide sobre el medio ambiente del cultivo y ocasiona cambios en ciertos rasgos morfológicos asociados con el rendimiento. Así, el área foliar, número de inflorescencias, número de ramificaciones, diámetro de los tallos, son afectados por cambios en la densidad según la especie, genotipo y ambiente (Haas, 1983; Arellano Vázquez, 2000; Torres Saldaña *et al.*, 2006). Los factores con mayor influencia sobre el rendimiento y la óptima densidad son: el sistema de cultivo, clima, época de siembra, tipo de suelo, precipitaciones y su distribución, por lo tanto es posible encontrar una considerable variación entre el rendimiento potencial y la densidad óptima aún en condiciones bajo riego (Haas, 1983; Arellano Vázquez, 2000).

En general existe para cada genotipo y ambiente un rango de densidades dentro del cual los rendimientos resultan relativamente constantes debido a que la disminución del rendimiento por planta es compensada por el aumento en la densidad. Por el contrario, densidades menores o mayores a este rango producen disminución del rendimiento (Tokatlidis y Koutroubas, 2004). Un ejemplo de ello es el caso de la pérdida de plantas y la desuniformidad en la emergencia que resulta en una disminución del rendimiento por unidad de área, debido a que las plantas restantes no pueden compensar esta pérdida (Tokatlidis y Koutroubas, 2004).

El sistema de siembra juega un rol de suma importancia en la implantación de un cultivo, por ejemplo, en cultivos bajo riego siembras efectuadas en la cara lateral del surco permiten una aplicación de agua inmediata y evita pérdida de plantas por encostramiento (Arriaga *et al.*, 1984). Una alternativa al incremento de la densidad es modificar la distribución de las plantas mediante el sembrado de las mismas en ambos lados del surco. El acortamiento entre hileras permite mantener la densidad constante, mejora el espacio dentro de la línea y

disminuye la competencia intraespecífica por luz, agua y nutrientes. Algunos estudios realizados en amaranto recomiendan para obtener óptimos rendimientos en grano utilizar espaciamientos de 10-50 cm entre plantas y de 70-80 cm entre surcos (Weber *et al.*, 1989; Kauffman y Weber, 1990).

En el caso del amaranto, el potencial de rendimiento de este pseudo-cereal se ha estudiado en diversos ambientes con el objetivo de evaluar el efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento y diversas variables biométricas (Robinson, 1986; Bansal *et al.*, 1995; Henderson *et al.*, 2000; Torres Saldaña *et al.*, 2006; Gimplinger *et al.*, 2008; García Pereyra *et al.*, 2009).

Este ensayo se planteó con el objetivo de evaluar diferentes densidades de siembra y espaciamientos entre plantas en el cultivo de amaranto, con la finalidad de establecer la densidad que permita alcanzar el óptimo productivo y económico para las condiciones edafoclimáticas del área de estudio.

## **6.2. Materiales y métodos**

Este ensayo se llevó a cabo durante los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013. El material genético utilizado fue *A. cruentus* cv Mexicano seleccionado a partir de ensayos preliminares.

### **6.2.1. Diseño experimental**

En cada año de ensayo se trabajó con un diseño experimental de 3 bloques con 7 tratamientos con diferentes densidades de plantas (S72, D86, S110, S143, D143, D286, D572) distribuidos al azar dentro de cada uno de ellos (Tabla 6.1). La superficie de cada parcela o subunidad experimental fue de 14 m<sup>2</sup> en la cual se sembraron 4 surcos de 5,00 m de

largo a una o dos caras del mismo, lo que permitió variar la distancia entre surcos de 0,70 m (identificado con la letra “S”) a 0,35 m (identificado con la letra “D”) (Tabla 6.1).

El número de plantas deseado en cada tratamiento se logró mediante raleo al alcanzar las plantas un porte de 20-30 cm.

**Tabla 6.1.** Tratamientos utilizados en el ensayo de densidades durante los ciclos productivos estudiados.

| Tratamiento | Densidad<br>(pl ha <sup>-1</sup> ) | Densidad lineal<br>(pl m <sup>-1</sup> ) | Distancia entre líneas<br>(m) |
|-------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| S72         | 71.500                             | 5  | 0,70                          |
| D86         | 85.800                             | 3  | 0,35                          |
| S110        | 110.000                            | 7  | 0,70                          |
| S143        | 143.000                            | 10                                       | 0,70                          |
| D143        | 143.000                            | 5  | 0,35                          |
| D286        | 286.000                            | 10                                       | 0,35                          |
| D572        | 572.000                            | 20                                       | 0,35                          |

### 6.2.2. Manejo del cultivo

Previo a la siembra se realizaron muestreos de suelo con el objetivo de determinar las características edáficas del sitio experimental para cada uno de los años de ensayo. El suelo presentó textura franca para ambos años, con propiedades químicas dentro de parámetros normales que lo califican de buena aptitud agrícola (Tablas 6.2).

**Tabla 6.2.** Determinaciones químicas de los suelos de los ensayos de densidades de siembra para los diferentes años de estudio.

| Ciclo productivo | Textura | Profundidad<br>(cm) | pH   | C.E.<br>(mmhos cm <sup>-1</sup> ) | MO<br>(%) | Nt<br>(%) | P Olsen<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|---------|---------------------|------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| 2011-2012        | Franco  | 0 - 20              | 7,90 | 0,57                              | 3,02      | 0,26      | 14,62                             |
|                  |         | 20 - 40             | 7,85 | 0,65                              | 1,80      | 0,20      | 12,30                             |
| 2012-2013        | Franco  | 0 - 20              | 8,02 | 0,37                              | 3,10      | 0,24      | 14,30                             |
|                  |         | 20 - 40             | 8,10 | 0,42                              | 1,6       | 0,16      | 11,92                             |

**Fuente:** Análisis realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal (L.A.S.A. y V.) de la Estación Experimental del Valle Inferior del Río Negro. C.E (conductividad eléctrica) y pH, ambos por método potenciométrico, MO: materia orgánica (Walkley y Black), Nt: nitrógeno total (Kjeldhal) P Olsen (fósforo extractable por metodología Olsen, 1954).

El manejo general del cultivo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos (Capítulo 2). Las fechas de siembra específicas fueron 1/12/11 y 30/11/12 para cada uno de los años de estudio respectivamente. El riego se aplicó en forma gravitacional según los requerimientos del cultivo. Para la fertilización se utilizó urea granulada a razón de 90 Kg ha<sup>-1</sup> de N. Ambos procedimientos se detallan en el Capítulo 2.

Las variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración fueron registradas mediante la estación meteorológica del sitio de estudio (Figuras 2.3 y 2.4 del Capítulo 2).

### 6.2.3. Datos recolectados

Durante el desarrollo del ciclo productivo se llevó a cabo el registro de diferentes variables morfofisiológicas: número de hojas visibles a inicio de panojamiento (**HIP**); número máximo de hojas (**MH**); número máximo de nudos (**MN**); número máximo de ramificaciones (**MR**); altura a cosecha (**AC**); longitud de panoja (**Lp**); diámetro del tallo (**ΦT**); número de hojas a cosecha (**HC**); número de ramificaciones a cosecha (**RC**); área foliar a cosecha (**AFC**); peso seco de tallo (**PSt**); peso seco de panoja (**PSp**); peso seco de hojas (**PSh**); peso seco de granos por panoja (**PSgp**); peso de mil granos (**P1000**); peso seco de granos por unidad experimental (**PSgue**); densidad de plantas a cosecha (**Dptc**); y porcentaje de plantas enfermas (**%Pe**) según la metodología detallada en el capítulo 2 de Materiales y Métodos.

Una vez obtenidos los valores de las variables detalladas anteriormente se procedió al cálculo de los siguientes indicadores: biomasa aérea de planta (**BApt**); peso seco de la estructura floral (**PSi**); número de granos por panoja (**Ngp**); rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico (**Re**) expresado como Kg ha<sup>-1</sup>; densidad de plantas por

hectárea (**Dptc ha<sup>-1</sup>**); biomasa aérea por hectárea o rendimiento biológico (**Rb**) expresado en Kg ha<sup>-1</sup>; e índice de Cosecha (**IC**).

A su vez, durante el desarrollo del ciclo productivo en cada subparcela se identificaron según lo descrito en el capítulo 4 diferentes estadios fenológicos tales como: días a emergencia (**E**); días a inicio de panojamiento (**IP**) y al 100% del mismo (**100%P**); días a inicio de antesis (**IA**) y al 100% de antesis (**100% A**); días a grano lechoso (**GL**); días a grano pastoso (**GP**); madurez fisiológica (**M**).

#### **6.2.4. Análisis estadístico**

A partir de los datos obtenidos se elaboraron tablas que fueron analizadas mediante el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). A cada variable se aplicó un ANOVA doble (años x tratamientos) con un diseño en cada año de bloques simples al azar.

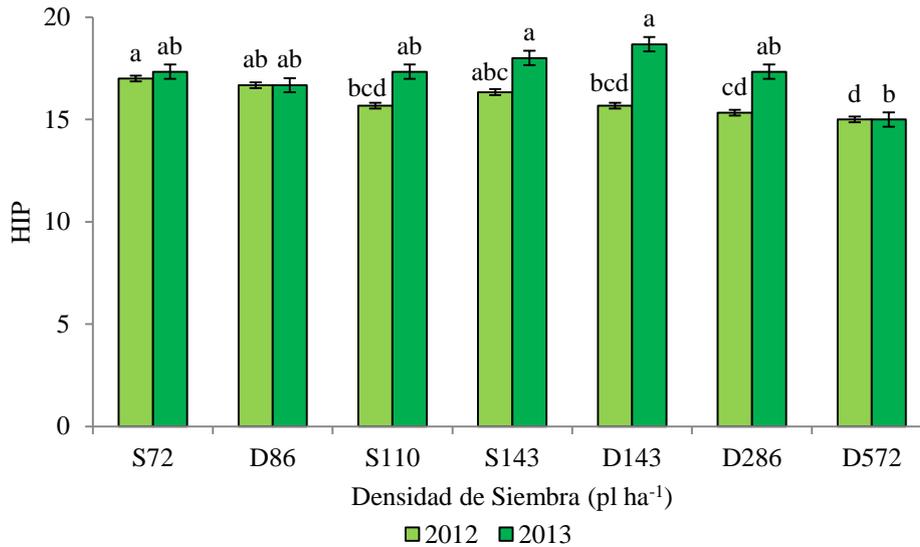
Las comparaciones de medias se realizaron con los promedios de ambos años mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% tanto en aquellas variables donde el test no detectó interacción con los años ( HC,  $\Phi$ T Re, P1000, %Pe) así como en aquellas donde la interacción fue considerada despreciable (HIP, MH, MN, MR, RC, AFC, AP, LP, Rb, DPtc, PSt, PSp, PSi, PSh, Bapt, PSgp, Ngp) debido a la presencia de un componente de varianza de poca relevancia ( $ETA^2 < 1\%$ ).  $ETA^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006). En el caso de la variable HIP el componente de varianza asociado a los años fue relevante y por este motivo se presentan los resultados para ambos años de ensayo por separado.

En lo que respecta a la fenología del cultivo los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA). El test de ANOVA se aplicó primeramente a la variable días a madurez del cultivo, dado que la misma representa la totalidad del ciclo productivo de la planta, y se realizó la comparación de medias mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años (Tabla 5.7). A continuación, el ciclo de crecimiento del cultivo se dividió en 6 períodos (E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; y M: madurez) que fueron analizados mediante el test de ANOVA. Las comparaciones de medias se realizaron con los promedios de ambos años mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% en todas las variables estudiadas dado que, el test no detectó interacción con los años. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008).

### **6.3. Resultados**

#### **6.3.1. Variables morfofisiológicas**

En el caso de la variable HIP, se halló un componente de varianza asociado a los años, a pesar de ello, para ambos ciclos de estudio se observó la tendencia a reducirse el número de HIP conforme se incrementó la densidad de siembra. D572 mostró los menores valores de esta variable sin embargo, la diferencia máxima entre las densidades extremas no superó las 2 hojas y osciló entre 15 y 17 hojas visibles (Figura 6.1).



**Figura 6.1.** Comportamiento promedio de hojas visibles a inicio de panojamiento para cada ciclo productivo estudiado según las diferentes densidades de siembra evaluadas. HIP: número de hojas visibles a inicio de panojamiento. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de cada ciclo seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En las variables morfológicas analizadas en este ensayo se observó una tendencia de las mismas a reducirse conforme se incrementó la densidad de siembra.

En el caso de MH y MN no se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos S72 y D86 pese al incremento de la densidad. Sin embargo, para MH y MR se hallaron diferencias entre los tratamientos S143 y D143 de igual densidad (Tabla 6.3).

**Tabla 6.3.** Máximo número de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

| Variable | Densidad de siembra |          |          |         |         |         |         | F   | p      |
|----------|---------------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----|--------|
|          | S72                 | D86      | S110     | S143    | D143    | D286    | D572    |     |        |
| MH       | 47,00 a             | 46,33 ab | 45,17 b  | 43,33 c | 40,83 d | 38,50 e | 35,50 f | 413 | < 0,01 |
| MN       | 43,67 a             | 42,33 a  | 40,67 b  | 38,50 c | 37,33 c | 35,67 d | 32,50 e | 387 | < 0,01 |
| MR       | 13,50 a             | 11,83 bc | 13,33 ab | 11,00 c | 7,67 d  | 6,83 d  | 3,67 e  | 290 | < 0,01 |

MH: máximo de hojas; MN: máximo de nudos; MR: máximo de ramificaciones. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ). GL: grados de libertad del CM error (cuadrado medio del error).

En MR se apreció una tendencia a reducirse conforme se incrementó la densidad de siembra a pesar de ello, D86 no mostró diferencias estadísticas significativas respecto de los tratamientos S110 y S143. Similar comportamiento se observó para las densidades más altas ensayadas (D286 y D572).

En las variables HC, RC y AFC se observó una tendencia reductiva conforme se incrementó la densidad de siembra, ya sea en las siembras realizadas en 1 (S) o 2 (D) caras del surco. En las densidades S143 y D143 se observaron diferencias en RC y HC (Tabla 6.4).

**Tabla 6.4.** Número de hojas, ramificaciones y área foliar a cosecha para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

| Variable                  | Densidad de siembra |           |           |           |           |           |         | F     | p      |
|---------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------|--------|
|                           | S72                 | D86       | S110      | S143      | D143      | D286      | D572    |       |        |
| HC                        | 27,50 ab            | 26,67 ab  | 27,83 a   | 27,83 a   | 26,33b    | 24,17 c   | 21,00 d | 226   | < 0,01 |
| RC                        | 7,17 a              | 5,17 b    | 5,67 b    | 5,00 b    | 4,17 c    | 1,50 d    | 0,00 e  | 600   | < 0,01 |
| AFC<br>(cm <sup>2</sup> ) | 1749,50 a           | 1689,17 b | 1699,50 b | 1606,17 c | 1585,67 c | 1458,67 d | 885,33e | 2.900 | < 0,01 |

HC: hojas a cosecha; RC: ramificaciones a cosecha; AFC: área foliar a cosecha. (cm<sup>2</sup>), S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ). GL: grados de libertad del CM error (cuadrado medio del error).

En las variables AC y  $\Phi T$  el test estadístico no detectó diferencias significativas en aquellas densidades menores o iguales a 143.000 pl ha<sup>-1</sup>, sin embargo, para densidades mayores se observó una reducción de esta variable (Tabla 6.5). En los tratamientos en los que AC se mantuvo MH aumentó.

En LP se manifestó una reducción conforme se incrementó la densidad de siembra. Así mismo, en los tratamientos a dos caras del surco este efecto fue más evidente. Para las tres densidades menores (S72, D86, S110) no se detectaron diferencias estadísticamente

significativas, a pesar de ello, se hallaron diferencias entre las distintas geometrías para la misma densidad (S143 y D143).

**Tabla 6.5.** Altura de planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

| Variable | Densidad de siembra |          |          |          |          |          |          | F      | p      |
|----------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|
|          | S72                 | D86      | S110     | S143     | D143     | D286     | D572     |        |        |
| AC (cm)  | 174,67 a            | 175,17 a | 175,67 a | 175,50 a | 173,17 a | 168,67 b | 164,00 c | 140,00 | < 0,01 |
| LP (cm)  | 46,00 a             | 45,00 a  | 44,83 a  | 42,50 b  | 40,00 c  | 35,50 d  | 28,00 e  | 1.169  | < 0,01 |
| ΦT (cm)  | 2,52 a              | 2,28 a   | 2,40 a   | 2,17 a   | 2,05 ab  | 1,65 bc  | 1,47 c   | 31,19  | < 0,01 |

AC: altura de planta a cosecha (cm); LP: longitud de panoja (cm); ΦT: diámetro del tallo (cm). S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ). GL: grados de libertad del CM error (cuadrado medio del error).

### 6.3.2. Rendimiento y sus componentes

En relación a las variables Rb y Dptc, las mismas mostraron una tendencia a aumentar conforme se incrementó la densidad de siembra. Para las variables PSt, PSp, PSi, PSh y BApt se aprecia una reducción de las mismas conforme se aumentó la densidad.

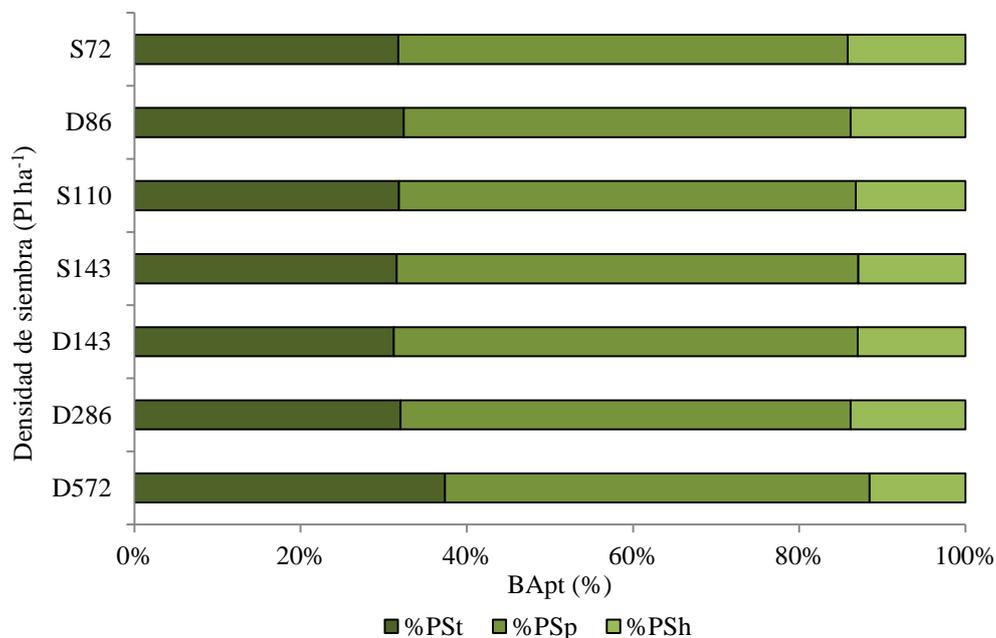
Para las diferentes geometrías e iguales densidades de plantas por hectárea se hallaron diferencias significativas dado que D143 siempre fue inferior a S143, excepto en Dptc donde la diferencia no fue significativa (Tabla 6.6).

En relación a BApt se observó que la panoja es el componente que más aporta a esta variable con valores mayores al 50%. En la densidad más elevada (D572) se observó un aumento del aporte realizado por PSt de un 37% mientras que en las restantes densidades osciló entre 31-32% (Figura 6.2).

**Tabla 6.6.** Valores promedio de rendimiento biológico y sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

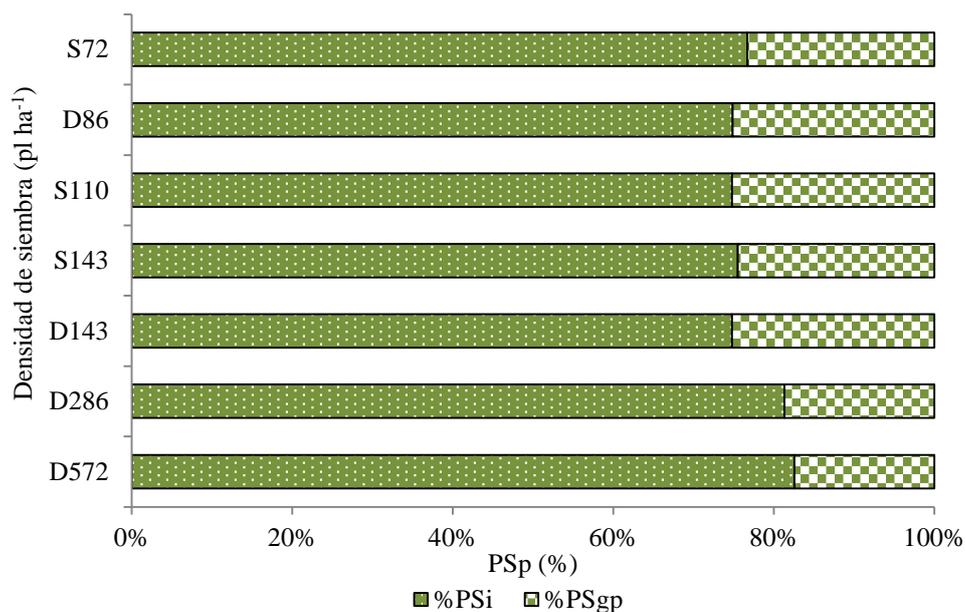
| Variable                  | Densidad de siembra |          |          |          |          |          |          | F     | p      |
|---------------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|--------|
|                           | S72                 | D86      | S110     | S143     | D143     | D286     | D572     |       |        |
| Rb (kg ha <sup>-1</sup> ) | 14558 f             | 16245 e  | 18760 d  | 20856 c  | 19174 d  | 29355 b  | 33026 a  | 938   | < 0,01 |
| Dptc                      | 70820 f             | 84248 e  | 97706 d  | 116071 c | 114669 c | 225303 b | 394025 a | 54622 | < 0,01 |
| PSt (g)                   | 65,33 a             | 62,50 b  | 61,17 b  | 56,67 c  | 52,17 d  | 41,67 e  | 31,33 f  | 1390  | < 0,01 |
| PSp (g)                   | 111,17 a            | 103,67 b | 105,50 b | 99,83 c  | 93,33 d  | 70,50 e  | 42,83 f  | 2789  | < 0,01 |
| PSi (g)                   | 85,30 a             | 77,55 bc | 79,67 b  | 74,73 c  | 69,80 d  | 57,33 e  | 35,37 f  | 1408  | < 0,01 |
| PSh (g)                   | 29,17 a             | 26,67 b  | 25,33 c  | 23,17 d  | 21,67 e  | 18,00 f  | 9,67 g   | 1260  | < 0,01 |
| BApt (g)                  | 205,67 a            | 192,83 b | 192,00 b | 179,67 c | 167,17 d | 130,17 e | 83,83 f  | 7237  | < 0,01 |

Rb: rendimiento biológico (kg ha<sup>-1</sup>), Dptc: densidad de plantas a cosecha, PSt: peso seco de tallo (g); PSp: peso seco de panoja (g), PSi: peso seco de estructura flora l(g), PSh: peso seco de hojas(g); BApt: biomasa aérea de planta (g). S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ). GL: grados de libertad del CM error (cuadrado medio del error).



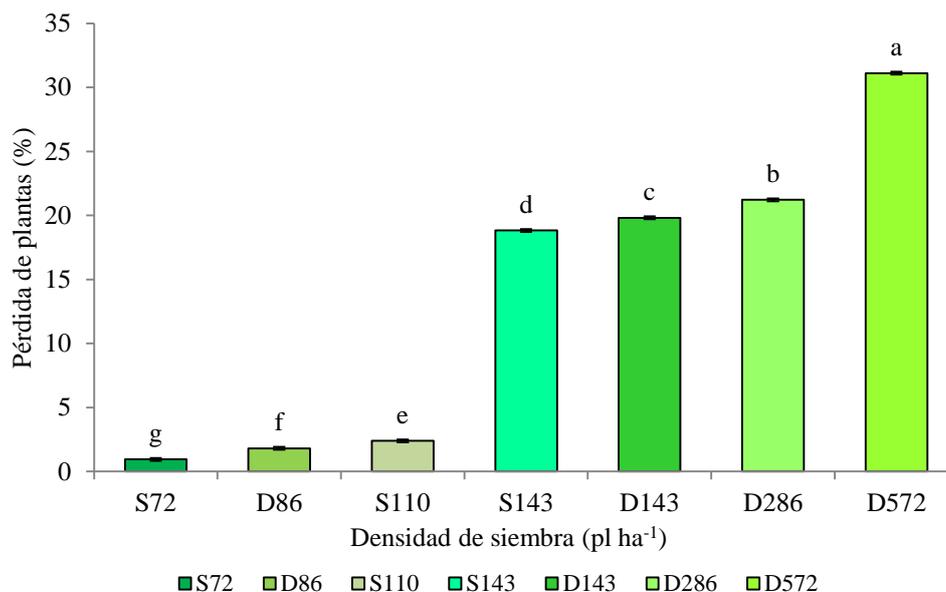
**Figura 6.2.** Comportamiento de la biomasa aérea de planta y sus componentes bajo las diferentes densidades de siembra evaluadas. BApt: biomasa aérea por planta (g); PSh: peso seco de hojas (g); PSt: peso seco de tallo (g), PSp: peso seco de panoja (g). S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>.

Un análisis más detallado del PSp mostró que PSi es el componente que más representa a esta variable. En las densidades más altas (D286 y D572) se observó un incremento de este componente de valores cercanos al 75% a valores mayores del 82% (Figura 6.3).



**Figura 6.3.** Comportamiento del peso seco panoja y sus componentes para las diferentes densidades de siembra evaluadas. PSp: peso seco de panoja (g); PSgp: peso seco de granos por panoja (g); PSi: peso seco de inflorescencia (g). S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>.

En relación a Dptc se observó una tendencia a incrementar conforme se aumentó la densidad de siembra, sin embargo, los porcentajes de pérdida de plantas se acrecentaron. Para densidades que varían entre 110.000 y 286.000 pl ha<sup>-1</sup> las pérdidas son de aproximadamente un 20%. Por encima de estas densidades se esperarían pérdidas mayores como ocurrió en 572.000 pl ha<sup>-1</sup> donde las pérdidas rondaron el 30% (Figura 6.4).



**Figura 6.4.** Pérdida porcentual de plantas según las diferentes densidades de siembra evaluadas. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

El rendimiento económico (Re) mostró una tendencia a incrementar conforme aumentó la densidad de siembra, sin embargo, no se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre S143 y las densidades más elevadas (D286 y D572). A pesar de ello, PSgp, P1000, y Ngp presentaron un comportamiento opuesto al de esta variable es decir, tendieron a reducirse conforme aumentó la densidad de siembra (Tabla 6.7).

Para PSgp y Ngp no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las densidades más bajas ensayadas.

En P1000 se observó una reducción conforme se incrementó la densidad de siembra sin embargo, la magnitud de esta disminución fue de 0,02 g entre S72 y D286. Para la mayor densidad ensayada (D572) el P1000 fue notoriamente menor (0,79 g) respecto de las restantes densidades (Tabla 6.7).

Los componentes de Re antes mencionados (PSgp, Ngp y P1000) se redujeron con el incremento de densidad, una tendencia similar se manifestó en BApt (Tabla 6.6).

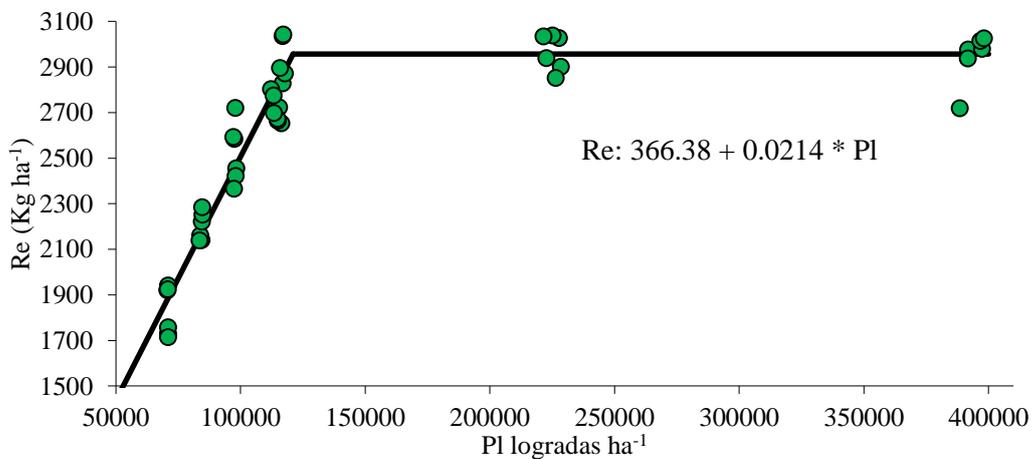
Los componentes de Re mostraron diferencias estadísticamente significativas entre S143 y D143 (Tabla 6.7). En todos los casos la densidad de siembra a 2 caras presentó valores menores respecto de la siembra a 1 cara del surco.

**Tabla 6.7.** Valores promedio de rendimiento económico y sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

| Variable                  | Densidad de siembra |           |           |           |           |           |           | F     | p      |
|---------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|
|                           | S72                 | D86       | S110      | S143      | D143      | D286      | D572      |       |        |
| Re (kg ha <sup>-1</sup> ) | 1831,67 e           | 2200,50 d | 2524,17 c | 2913,33 a | 2698,17 b | 2965,67 a | 2942,33 a | 346   | < 0,01 |
| PSgp (g)                  | 25,87 a             | 26,12 a   | 25,83 a   | 25,10 b   | 23,53 c   | 13,17 d   | 7,47 e    | 16931 | < 0,01 |
| P1000 (g)                 | 0,87 a              | 0,87 a    | 0,86 b    | 0,86 b    | 0,85 c    | 0,85 c    | 0,79 d    | 2000  | < 0,01 |
| Ngp                       | 29659 ab            | 30049 a   | 29966 a   | 29230 b   | 27587c    | 15554 d   | 9523 e    | 16220 | < 0,01 |

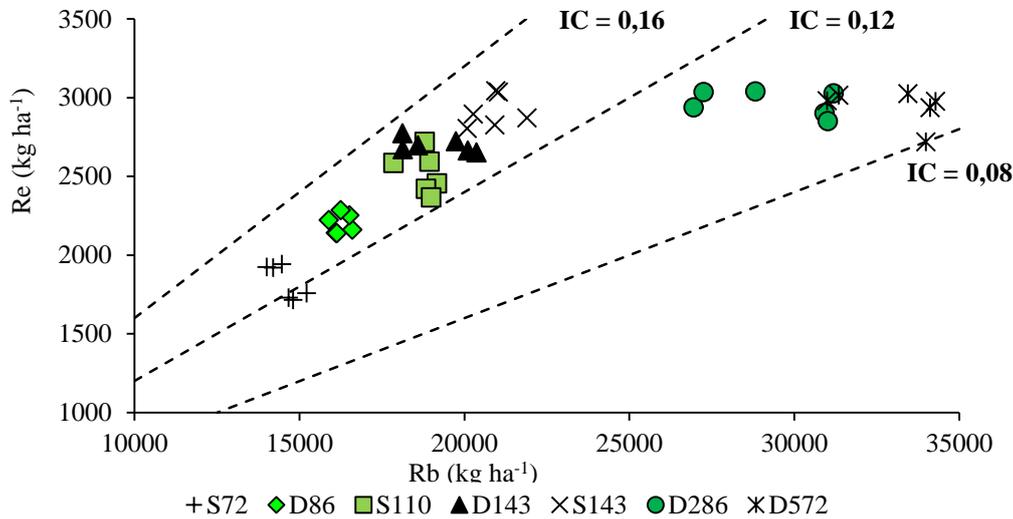
Re: rendimiento económico (kg ha<sup>-1</sup>), PSgp: peso seco de granos por panoja (g), P1000: peso de mil granos (g), Ngp: número de granos por panoja (g); S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ). GL: grados de libertad del CM error (cuadrado medio del error).

Al evaluar Re en función de las plantas logradas se observó que el rendimiento incrementó de manera lineal hasta aproximadamente las 116.000 pl ha<sup>-1</sup>. Por encima de esta densidad los rendimientos se mantienen, lo que indica un comportamiento lineal plato entre estas variables (Figura 6.5).



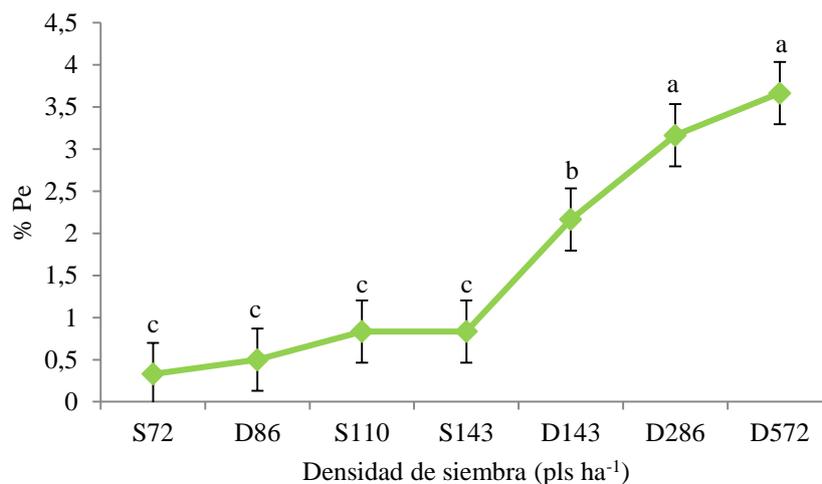
**Figura 6.5.** Curva de ajuste del rendimiento económico en función de la densidad de plantas logradas a cosecha.

El comportamiento del IC mostró una tendencia a incrementar conforme se aumentó la densidad de siembra hasta un valor de 143.000 pl ha<sup>-1</sup>, sin embargo, en las densidades más elevadas (D286 y D572) se observó una reducción de esta variable (Figura 6.6)



**Figura 6.6.** Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes densidades de siembra ensayadas. IC: índice de cosecha; Re: rendimiento económico (kg ha<sup>-1</sup>); Rb: rendimiento biológico (kg ha<sup>-1</sup>); S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>.

En relación al % Pe se observó que la incidencia de “mancha negra del tallo” incrementó conforme aumentó la densidad de siembra a partir de D143 (Figura 6.7).



**Figura 6.7.** Incidencia de plantas enfermas con *Macrophoma sp.* para las diferentes densidades de siembra ensayadas. %Pe: % de plantas enfermas S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>.

### 6.3.3. Fenología del cultivo

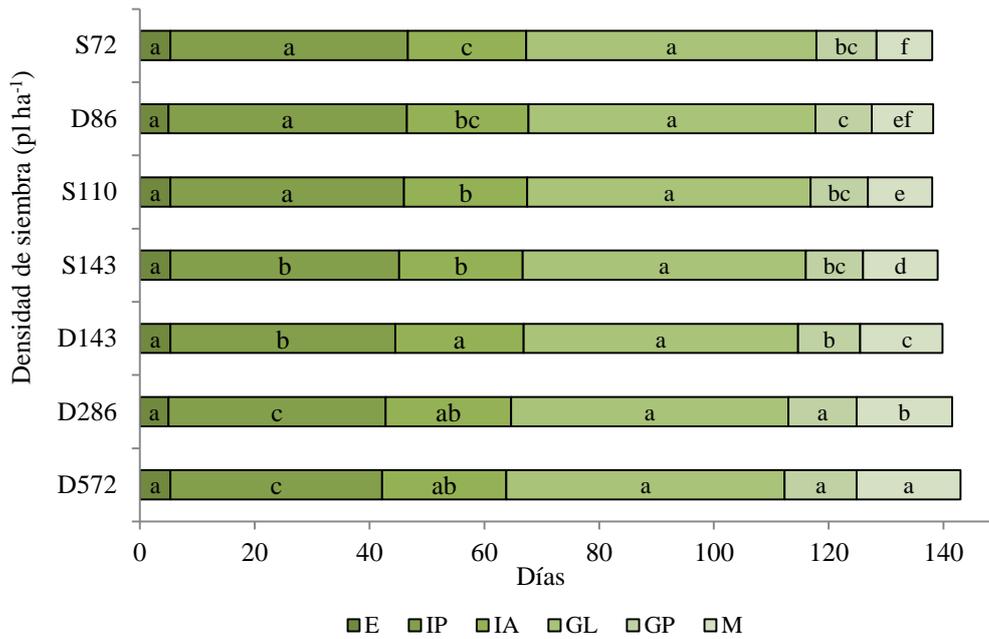
En relación al comportamiento fenológico del cultivo en función de las diferentes densidades de siembra ensayadas se observó que la mayoría de los estadios estudiados (E, IP, 100% IP, IA, 100% IA, GL y GP) tendieron a incrementar el número de días conforme se redujo la densidad de siembra. A pesar de ello, en el estadio M este comportamiento se revierte, es decir se reduce el número de días conforme se redujo la densidad (Tabla 6.8).

**Tabla 6.8.** Valores promedios en días para las variables fenológicas registradas en los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013 para las diferentes densidades de siembra ensayadas.

| Tratamiento | E    | IP    | 100% P | IA    | 100% A | GL     | GP     | M         |
|-------------|------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-----------|
| S72         | 5,33 | 46,67 | 95,67  | 67,33 | 108,17 | 117,83 | 128,33 | 138,00 e  |
| D86         | 5,00 | 46,50 | 95,67  | 67,67 | 107,50 | 117,67 | 127,50 | 138,17 de |
| S110        | 5,33 | 46,00 | 93,83  | 67,50 | 107,00 | 116,83 | 126,83 | 138,00 e  |
| S143        | 5,33 | 45,17 | 88,17  | 66,67 | 105,83 | 116,00 | 126,00 | 139,00 cd |
| D143        | 5,33 | 44,50 | 87,67  | 66,83 | 104,83 | 114,67 | 125,50 | 139,83 c  |
| D286        | 5,00 | 42,83 | 84,50  | 64,67 | 102,67 | 113,00 | 124,83 | 141,50 b  |
| D572        | 5,33 | 42,21 | 83,17  | 63,83 | 102,67 | 112,33 | 124,88 | 142,96 a  |

E: emergencia; IP: inicio de panojamiento, IA: inicio de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso; M: madurez fisiológica. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En IP se manifestaron las primeras diferencias entre densidades, este estadio es el que más variación entre tratamientos aportó al ciclo de cultivo (5 días). En los estadios siguientes la variación fue de 2-3 días. Estas diferencias observadas en el número de días dentro de cada estadio se manifestó en una mayor duración del ciclo de cultivo en las densidades ensayadas más elevadas (Figura 6.8).



**Figura 6.8.** Duración de los estadios fenológicos evaluados para cada densidad de siembra ensayada. E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; M: madurez; S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

En relación a la longitud del ciclo en GDD se observó la tendencia de los mismos a incrementar conforme se aumentó la densidad de siembra. Los valores obtenidos fueron: 1690, 1690, 1689, 1696, 1702, 1716, 1736 GDD para cada densidad respectivamente. Es importante destacar que no se hallaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de densidades más bajas (S72, D86, S110 y S143), como en aquellos de igual densidad (S143 y D143).

#### 6.4. Discusión

En la variable HIP se observó que D572 iniciaba el panojamiento con un menor número de hojas visibles respecto de las restantes densidades, posiblemente debido a la mayor competencia existente entre plantas. Este hecho se corresponde con la disminución del 60% observada en BApt. En HIP la magnitud de las diferencias entre densidades es muy pequeña

(2 hojas) lo que permite suponer que el inicio del panojamiento entre 15 y 17 hojas se trata de un atributo de este genotipo independiente de la densidad de siembra utilizada.

En relación a las restantes variables morfológicas estudiadas, se observó la reducción de las mismas conforme aumentó la densidad de siembra.

Re y Rb incrementaron con el aumento de densidad de siembra. En la densidad de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> se evidenció cómo el efecto de la geometría de las plantas incidió en el desarrollo de las mismas. En el caso particular de las variables MH y MR, S143 mostró valores mayores a D143 hecho que se reflejó luego en el mayor número de HC y RC, sin embargo, la variable AFC no mostró diferencias entre estas densidades. Densidades superiores a D143 reducen las variables antes mencionadas (MH, MR y AFC). Posiblemente debido a la mayor competencia intraespecífica que se manifestó y al mayor sombreado entre plantas, lo que ocasionó una temprana senescencia de hojas y ramificaciones. En coincidencia con ello algunos autores mencionan que altas densidades promueven menor número de ramificaciones, menores diámetros de tallo y una maduración más uniforme (Edwards, 1981; Hass, 1983; Guillen Portal *et al.*, 1999; Torres Saldaña *et al.*, 2006; Yarnia *et al.*, 2010; Cassini y La Rocca, 2014). Así mismo, se ha observado una reducción del área foliar, del número de semillas y del rendimiento en grano por planta (Yarnia *et al.*, 2010).

La reducción observada en el MH, MR conforme se incrementó la densidad de afectó a Rb, Re y a sus componentes (PSgp, P1000, y Ngp), dado que el área foliar es la responsable de la producción de fotosintatos destinados al llenado del grano.

La AC se redujo al aumentar la densidad de siembra por encima de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> con la consecuente disminución observada en el MN, MH y MR. En la densidad de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> no se hallaron diferencias en AC ni en  $\Phi T$  entre S143 y D143 lo que permite suponer que estas variables no se ven afectadas por la geometría de siembra.

El MN y MH se redujo conforme aumentó la densidad de plantas así como al disminuir la distancia entre surcos. Resultados similares fueron hallados por Peiretti y Gesumaria (1991), y Peiretti y Gesumaria (1998).

A diferencia de este ensayo, Henderson *et al.*, (2000) hallaron que un espaciamento menor como resultado de diferentes distancias de siembra (0,30 y 0,76 m) incrementó la competencia entre plantas las cuales se caracterizaron por ser más altas y de tallos débiles lo cual contribuyó al vuelco de las mismas.

Similares resultados a los hallados en los ensayos de esta tesis fueron observados por otros autores quienes encontraron que mayores alturas de planta se logran a bajas densidades de siembra (Guillen Portal *et al.*, 1999; Henderson *et al.*, 2000; Gimplinger *et al.*, 2008). A su vez, diversos trabajos confirman la reducción de la altura de planta, del número de ramificaciones, y del diámetro del tallo conforme aumenta la densidad de plantas (Putman, 1990; Fitterer *et al.*, 1996; Malligawad y Patril, 2001; Gimplinger *et al.*, 2008; Cassini y La Rocca, 2014). En otros ensayos, y a diferencia de lo observado en este trabajo, no se hallaron diferencias significativas en la altura de planta para las diferentes densidades evaluadas (Guillen Portal *et al.*, 1999) mientras que para Torres Saldaña *et al.*, (2006) la altura se incrementa con la densidad de plantas.

Según los resultados obtenidos el Re incrementó conforme aumentó en la densidad de siembra hasta las 143.000 pl ha<sup>-1</sup> sembradas a una cara del surco con más de 2.900 kg ha<sup>-1</sup>. En concordancia con lo antes mencionado un ensayo realizado en este cultivo en condiciones de secano, mostró variaciones en el rendimiento entre 1.860 y 3.340 kg ha<sup>-1</sup> conforme aumentó la densidad de siembra de 55.555 a 222.222 pl ha<sup>-1</sup> (Malligawad y Patril, 2001). La misma tendencia fue observada por otros autores (Edwards, 1981; Misra *et al.*, 1985; Sánchez *et al.*, 1991; Peiretti y Gesumaria, 1991; Apaza Gutierrez *et al.*, 2002; Kübler *et al.*, 2002). Sin

embargo, esta información se contradice con lo hallado por otra serie de autores (Robinson, 1986; Ramírez Vazquez *et al.*, 2011; Cassini y La Rocca, 2014).

Otro ensayo reveló que el rendimiento de amaranto muestra una pequeña variación entre 75.000 y 275.000 pl ha<sup>-1</sup> y bajo condiciones de adecuada humedad y nutrientes los rendimientos incrementan hasta densidades de 360.000 pl ha<sup>-1</sup> (Anonymous, 1991 citado por Malligawad y Patril, 2001).

En México fueron reportados rendimientos de 500 y 1.500 kg ha<sup>-1</sup> para densidades entre 50.000 y 100.000 pl ha<sup>-1</sup> (Alejandre Iturbide y Gómez Lorence, 1986). Mejoras en las variedades permitieron la utilización de densidades mayores a 350.000 pl ha<sup>-1</sup> con rendimientos entre 1.800 y 2.500 kg ha<sup>-1</sup> (Estrada y Sahagún, 2001). Para densidades de 125.000 pl ha<sup>-1</sup> obtuvieron rendimientos promedios de 1.600 kg ha<sup>-1</sup>, y con densidades mayores lograron menores rendimientos en grano pero mayores rendimientos en forraje según el genotipo utilizado (García Pereyra *et al.*, 2009).

En este ensayo los componentes de Re muestran un comportamiento opuesto al de esta variable, es decir se reducen con el incremento de densidad, excepto a bajas densidades donde no se encontraron diferencias. Esto permite suponer que los mayores valores de Re se deben al mayor número de plantas por hectárea.

En el caso particular de la densidad de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> todos los componentes de Re al igual que LP resultaron mayores en S143 respecto de D143. Posiblemente la geometría de siembra incidió en estas variables. Lo antes mencionado concuerda con los resultados hallados por otros autores, quienes mencionan que el incremento en el espaciamiento entre surcos (0,20; 0,38; 0,76 m) aumenta los rendimientos (Peiretti y Gesumaria, 1998; O'Brien y Price, 2008). Así mismo, se contradice con los resultados hallados por Robinson (1986); quien obtuvo valores de rendimiento similares entre sí con una densidad de 180.000 pl ha<sup>-1</sup> sembradas a diferentes distancias entre líneas. En el mismo sentido, pero a diferencia de los

resultados de esta tesis, otro autor con una densidad de 111.111 pl ha<sup>-1</sup> en diferentes arreglos geométricos no encontró efectos sobre el rendimiento (Malligawad y Patril, 2001).

Conforme aumentó la densidad de siembra LP disminuyó con la consecuente reducción de PSp el cual estaría representado por el menor valor de PSi. Sin embargo, este último parámetro se vio incrementado porcentualmente respecto de PSp, efecto que posiblemente estaría asociado a la disminución del PSgp debido al menor Ngp. Esta reducción en el Ngp podría deberse al mayor número de flores abortadas en las densidades más altas. En concordancia con lo antes mencionado, algunos autores señalan que altas densidades reducen la longitud de panoja y el rendimiento en grano por planta debido a la competencia intraespecífica (Guillen Portal *et al.*, 1999; Gimplinger *et al.*, 2008; Yarnia *et al.*, 2010).

Los mayores valores de LP observados al reducir la densidad de siembra son acompañados de un incremento en  $\Phi T$ , respuesta estructural de la planta que podría asociarse al mayor PSp que debe soportar el tallo para evitar el vuelco.

Densidades intermedias facilitan un mayor desarrollo del porte general de las plantas característica que permitiría un incremento del suministro de nutrientes a los órganos reproductivos y en consecuencia un mayor peso y número de granos hecho que justificó el aumento de Re por planta. Lo antes descrito concuerda con lo hallado por numerosos autores (Henderson *et al.*, 1993; Peiretti y Gesumaria, 1998; Gimplinger *et al.*, 2008; García Pereyra, 2009).

En cuanto al P1000 resultó afectado por el incremento de densidad y por la geometría de siembra, lo cual va en el sentido de lo hallado por Pourfarid *et al.* (2014) aunque contradice lo observado por otros autores (Peiretti y Gesumaria, 1998; Gimplinger *et al.*, 2008).

Con menor densidad de siembra se manifestó una mayor BApt posiblemente, debido al mayor espaciamiento disponible para el desarrollo de cada planta. Estos resultados concuerdan con lo hallado en la bibliografía (Edwards y Volak 1980; Henderson *et al.*, 2000;

Malligawad y Patril, 2001; Yarnia *et al.*, 2010). Sin embargo, en este ensayo Rb es mayor en las densidades más altas dado que la reducción de BApt se compensaría con el mayor número de plantas por hectárea. En relación a estos parámetros es importante comentar los resultados de la figura 6.5 según la misma el Re aumenta en forma lineal hasta una Dptc de alrededor de 125.000 pl ha<sup>-1</sup>. A partir de esa densidad el Re muestra un comportamiento lineal plato. La fase de aumento lineal de Re fue una consecuencia de la disminución de BApt y del PSgp los cuales fueron en proporción inferiores al aumento del número de plantas. En la fase lineal plato la disminución de BApt y del PSgp en cambio fue compensada por el aumento del número de plantas logradas. Teóricamente si se continuara aumentando el número de plantas se alcanzaría un punto a partir del cual Re hubiera comenzado a disminuir.

En las densidad de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> se hallaron diferencias en Rb a favor de S143 pese a no haber diferencias en Dptc. Esta característica podría atribuirse a la reducción observada en los componentes de BApt en D143 por la disposición geométrica de siembra. Resultados similares fueron hallados por Tongos (2016) donde un mayor espaciamiento de siembra promovió mayores rendimientos de materia seca.

La reducción observada en IC en las densidades de siembra más altas se debió a los incrementos de Re y Rb. Estos resultados concuerdan con lo hallado por Gimplinger *et al.*, (2008) y Yarnia *et al.*, (2010).

En relación a Dptc, el porcentaje de pérdida de plantas fue mayor al 30 % para densidades de siembra que superan los 286.000 pl ha<sup>-1</sup>. Valores de pérdida de plantas entre 11 y 25% fueron hallados para densidades de 173.000 y 272.000 pl ha<sup>-1</sup> respectivamente (Henderson *et al.*, 2000). El incremento en el número de plantas por hectárea ocasiona mayor competencia intraespecífica por nutrientes, luz y espacio físico hecho que produce una importante pérdida de plantas. La reducción en el número de plantas observado en este ensayo podría estar

relacionada, en menor medida, con la manifestación de la enfermedad de la mancha del tallo la cual incrementó al aumentar la densidad de siembra.

Densidades más elevadas producen el sombreado del suelo y condiciones de humedad y temperatura mayores bajo la canopia que favorecen el desarrollo de *Macrophoma sp.*

En relación a la fenología del cultivo se observó una tendencia a incrementar la longitud del ciclo en un tiempo cronológico de 5 días o de 46 GDD conforme se aumentó la densidad de siembra. Este resultado se contradice con lo hallado en la bibliografía donde numerosos autores observaron una reducción del ciclo de cultivo o ninguna diferencia en el mismo conforme se incrementó la densidad de siembra (Edwards, 1981; Hass, 1983; Wall, 1986 citado por Henderson *et al.*, 2000; Putman 1990; Gimplinger *et al.*, 2008; Repollo *et al.*, 2010; Cassini y La Rocca, 2014).

En las densidades de siembra más elevadas el cultivo mostró un mayor contenido de humedad en las panojas (observación de campo). Este hecho podría deberse a que a nivel de cultivo las condiciones ambientales del sitio de estudio en el período en el cual se realizó la cosecha del cultivo, se caracterizan por presentar una humedad relativa ambiente elevada en las primeras horas de la mañana y en las últimas de la tarde cuando las temperaturas son menores. Por otra parte, en las densidades de cultivo más elevadas las panojas fueron más pequeñas y compactas respecto de las densidades más bajas hecho que dificulta la circulación del aire y el secado más rápido de las mismas. Algunos autores mencionan que altas densidades incrementan la humedad relativa dentro de la canopia y la duración del área foliar debido a que se reduce el movimiento de aire y la penetración de la luz solar (Burdon y Chilvers, 1982; Tu, 1997).

Numerosos trabajos mencionan que altas densidades permiten un mejor control de malezas al reducir la competencia interespecífica (Kauffman y Hass, 1984; Robinson, 1986; Peiretti y Gesumaria, 1998). Este efecto fue evidente durante los primeros estadios del cultivo en los ensayos realizados en esta tesis, sin embargo, altas densidades implicaron mayor pérdida de plantas por competencia intraespecífica. Este resultado concuerda con lo descrito en la bibliografía (Guillen Portal *et al.*, 1999; Henderson *et al.*, 2000; Apaza Gutiérrez *et al.*, 2002; Gimplinger *et al.*, 2008; Yarnia *et al.*, 2010).

En relación a los valores de germinación y duración de ciclo de cultivo los resultados de este ensayo se encuentran dentro de los rangos de valores publicados para la provincia de La Pampa Argentina, donde se evaluaron 18 genotipos de amaranto con períodos de inicio de germinación de 5 días y una longitud de ciclo de 127 y 169 días para los genotipos de ciclo corto y largo respectivamente (Reinaudi *et al.*, 2011).

Al comparar este ensayo con el de estadios fenológicos realizado para el capítulo 4 de esta tesis, se observó que en la 2ª fecha de siembra de este último se logró una densidad de plantas a cosecha aproximada de 125.000 pl ha<sup>-1</sup> con una duración total de ciclo de 137 días. Estas condiciones se asemejan al tratamiento S143 el cual alcanzó la madurez del cultivo a los 139 días.

## **6.5. Conclusiones**

Una densidad de siembra intermedia respecto de las ensayadas permite: un adecuado stand de plantas a cosecha, el desarrollo general de las mismas y altos rendimientos económicos y biológicos. A su vez, reduce los costos en semilla respecto de las densidades más elevadas.

Por otra parte, el espaciamiento entre surcos favorece las labores de control de malezas, fertilización, aporque y reduce la incidencia de enfermedades del cultivo para la zona del Valle Inferior de Río Negro.

Al utilizar una densidad intermedia la competencia entre plantas no incide de manera relevante sobre su estructura morfológica, lo que reduce las condiciones de estrés intraespecífico severas.

La extensión del ciclo de cultivo observada en altas densidades es un factor a considerar para la zona de estudio dado que usualmente el período de cosecha coincide con el período de precipitaciones. Por lo tanto, cosechas tempranas evitan un incremento de humedad en la panoja, la germinación de granos e incluso pérdidas de rendimiento ocasionado por el desgrane de las plantas debido a las precipitaciones.

Por lo antes mencionado, en base a la respuesta morfofisiológica del cultivo, se considera como densidad óptima para la zona de estudio  $143.000 \text{ pl ha}^{-1}$  sembradas a 0,70 m.

## **7. FRECUENCIAS DE RIEGO**

---

### **7.1. Introducción.**

El agua dulce es un recurso escaso que es esencial preservar debido a la demanda constante y creciente de la misma, fundamentalmente para consumo humano que se encuentra en exponencial crecimiento. La misma es de gran utilidad en las actividades agropecuarias dado que el riego permite generar mejores cosechas y mayores ingresos, sin embargo, su escasez en algunas zonas del país (PROCISUR, 2010) y del mundo requiere de un aprovechamiento eficiente. En efecto, la agricultura bajo riego es uno de los consumidores principales de agua a escala mundial (más del 70% del agua dulce utilizada es en la agricultura). Alrededor del 40% de la producción de alimentos se realiza bajo riego lo que enfatiza la necesidad de usar más eficientemente el recurso agua (FAO, 2006). A su vez, el uso de grandes volúmenes de agua en prácticas de riego inadecuadas puede generar lavado de nutrientes, elevación de napa freática, salinización y/o sodificación del suelo, incremento en la incidencia de enfermedades, contaminación de agua subterránea e incluso la disminución de rendimientos de los cultivos.

La carencia de agua afecta directamente el desarrollo de las plantas y es una de las principales fuentes de estrés de las mismas ya que afecta sustancialmente el metabolismo de las plantas, hecho que reduce el crecimiento y la tasa de fotosíntesis mediante la disminución del ritmo de asimilación del CO<sub>2</sub>. El amaranto, al igual que muchos cereales, ante un estrés hídrico durante la fase reproductiva es de suponer que responda con la disminución del rendimiento probablemente debido a la reducción del número de semillas por aborto de embriones, o bien a que durante el período de sequía la planta removiliza tempranamente sus reservas lo cual produce un posterior desbalance en el metabolismo durante el llenado del grano (Bancal, 2008). El crecimiento de la biomasa depende del balance entre la fotosíntesis y la respiración, a su vez el crecimiento expansivo se asocia a la interrelación entre la

extensibilidad de la pared celular, el gradiente potencial agua y la conductancia hidráulica de la vía de conducción del agua hacia la célula (Lockhart, 1965). En relación a lo antes descrito se ha observado que inflorescencias jóvenes de plantas de girasol y maíz sometidas a un estrés moderado reducen su área y número de óvulos sin manifestar una disrupción en el metabolismo del carbono (Dosio *et al.*, 2011; Oury *et al.*, 2016). Estos autores proponen que las plantas coordinan la disminución del ritmo del crecimiento expansivo y del flujo de fotosintatos, lo que determina el aborto temprano de las semillas a fin de evitar el flujo de carbón hacia el resto de los óvulos.

Así mismo, a lo largo de la evolución las plantas han generado diferentes respuestas y adaptaciones que les permiten tolerar distintos niveles de déficit de agua que van desde un estrés hídrico leve hasta la posibilidad de sobrevivir en hábitats desérticos (Nilsen y Orcutt, 1996). Las adaptaciones posibles de observar en las plantas son de orden morfológico, anatómico, celular y molecular, todas ellas con la finalidad de lograr una mayor captación de agua o bien un uso más eficiente de la misma. Además de las respuestas de defensa antes mencionadas, las plantas han desarrollado cambios en el crecimiento, procesos metabólicos tipo C<sub>4</sub> y CAM, cierre de estomas, expresión de genes y síntesis de osmolitos entre otras (Salisbury y Ross, 1992; Boote *et al.*, 1994; Moreno y Liz, 2009).

El amaranto ha sido considerado una especie con capacidad de adaptarse a diversidad de ambientes, incluso en aquellos donde son habituales situaciones de estrés hídrico, como ocurre en las regiones semiáridas (Liu y Stützel, 2004; Mlakar *et al.*, 2012). Esta particularidad se atribuye, principalmente, a su eficiencia en el uso del agua relacionada a la vía metabólica C<sub>4</sub> que caracteriza a esta especie y le permite hacer un uso más eficiente del CO<sub>2</sub> disponible en el ambiente. A su vez, ciertas características de la estructura de la planta resultan de gran importancia para tolerar el estrés hídrico, tales como: reducción del crecimiento de las hojas, disminución del área foliar, modificación de la partición de la

biomasa, incremento en la longitud de la raíz principal y aumento del número de raíces laterales (Hauptli, 1977; Putman, 1990; Johnson y Henderson, 2002; De la Cruz Guzmán *et al.*, 2010). Así mismo, la gran diversidad de genotipos permite seleccionar la mejor opción agronómica en cada ambiente (Schahbazian *et al.*, 2006).

En relación a los mecanismos de respuesta al estrés hídrico que posee el amaranto existe poca evidencia. En variedades hortícolas se ha reconocido su alta capacidad de ajuste osmótico, el cual consiste en la acumulación de solutos en respuesta al déficit hídrico y en consecuencia disminuye el potencial hídrico total de hojas, tallos y raíces, y como resultado posibilita la absorción de agua y mantenimiento de la actividad fisiológica (Liu y Stützel, 2002a). Por otra parte, el amaranto reduce la pérdida de agua por transpiración a través de la disminución del área foliar y la conductancia estomática, de este modo previene la deshidratación de tejidos (Liu y Stützel, 2002b).

Otra característica en respuesta al estrés hídrico de este cultivo se relaciona con su sistema radical el cual presenta la habilidad de aumentar su profundidad ante situaciones de escasez de agua (Johnson y Henderson 2002).

Por otro lado un incremento en la eficiencia del uso del agua requiere implementar mejoras en los sistemas y técnicas de riego. La infraestructura de todo sistema de riego comienza desde la toma de agua del canal principal hasta el establecimiento, seguido por un sistema de distribución del agua dentro del mismo hasta su aplicación por alguno de los métodos de riego conocidos al cultivo. Entre ellos podemos mencionar el riego por superficie o por inundación (surco, borde, manto); por aspersión; y por goteo (superficial o enterrado). La eficiencia de aplicación de los métodos enunciados es aproximadamente de 60, 75 y 90%, respectivamente (Dworak *et al.*, 2007).

Entre las técnicas que permiten mejorar la eficiencia de uso de agua se encuentra el manejo de la frecuencia de riego, dado que, la misma afecta la dinámica del agua en el suelo,

la distribución de raíces, la cantidad de agua absorbida por la raíces y la cantidad de agua lixiviada fuera de la zona de raíces (Wang *et al.*, 2006). Otra opción es el riego alternado es decir, regar cada mitad del volumen radicular en forma alternada. La base fisiológica de este método se centra en que bajo cierto nivel de estrés hídrico una raíz envía señales a la parte aérea con el objeto de cerrar los estomas y reducir la pérdida de agua por transpiración (Kang y Zhang, 2004).

Otra alternativa para aumentar la eficiencia de los sistemas de riego es reducir la cantidad de agua que se necesita para efectuar un riego “óptimo o total” es decir, efectuar un riego deficitario pero sin disminuir el rendimiento en grano aunque haya una reducción en el rendimiento biológico (Qiang *et al.*, 2014). Esta técnica aumenta la productividad del agua respecto de la irrigación “total” (Ferreeres y Soriano, 2007). El “riego deficitario” permite un ahorro considerable de agua mediante la utilización de cierto grado de estrés hídrico durante un período determinado de tiempo o durante toda una etapa de crecimiento de un cultivo (English y Raja, 1996). Muchos estudios muestran que la técnica de riego deficitario expone a las plantas por un corto tiempo en una condición de estrés moderado y cuando el riego es restablecido el crecimiento y desarrollo de planta reinicia a un nivel similar al de las plantas bajo óptima irrigación (Kang *et al.*, 2000). Por esta razón, para el control del estrés es necesario un cuidadoso manejo del riego, ello significa: determinar la cantidad de agua a aplicar, el tiempo de aplicación, y conocer la sensibilidad del cultivo a la falta de agua en sus distintas etapas fenológicas (Qiang *et al.*, 2014). La técnica de riego deficitario permitirá un manejo más eficiente del recurso hídrico y un ahorro de agua dado que la aplicación de esta técnica se fundamenta en que la reducción del rendimiento sea poco significativa respecto del beneficio que se obtiene por el ahorro de agua y en consecuencia se logren mayores retornos económicos (Bekele y Tilahum, 2007). Es importante considerar la fisiología del cultivo

desde el punto de vista del metabolismo del CO<sub>2</sub> que posea (C3, C4, CAM) y de la posición geográfica del lugar dado que la misma puede tener efectos en la tasa de evapotranspiración.

La eficiencia de uso de agua (EUA) se define como la relación entre la acumulación de biomasa total o rendimiento en grano y el consumo hídrico. Este último es expresado como transpiración, evaporación, agua aplicada o entrada total de agua al sistema (Stewart *et al.*, 1977; Molden, 1997; Dehghanisanij *et al.*, 2009). En los casos de riego deficitario en la producción de cultivos la EUA total y/o de riego más utilizada se calcula con la siguiente fórmula (Qiang *et al.*, 2014):

$$\text{EUA (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{Re}_i - \text{Re}_s)}{\text{Ir}} \quad (\text{Fórmula 1})$$

Donde Re<sub>i</sub> es el rendimiento del cultivo irrigado y Re<sub>s</sub> es el rendimiento del cultivo sin riego o de secano equivalente, e Ir es la cantidad de agua de riego aplicada.

La región del valle de Río negro presenta clima semiárido y una superficie importante de sistemas de producción bajo riego, con disponibilidad hídrica de calidad. Es importante realizar un manejo adecuado de este recurso que permita preservar la productividad de los suelos y lograr una mayor diversificación productiva.

Este ensayo se planteó con el objetivo específico de evaluar diferentes frecuencias de riego en el cultivo de amaranto para las condiciones edafoclimáticas de la zona del Valle Inferior del Río Negro con la finalidad de establecer si una aplicación mínima de agua permite alcanzar el óptimo productivo y económico como lo propone la técnica de riego deficitario.

## **7.2. Materiales y métodos**

Este ensayo se llevó a cabo durante los ciclos productivos 2012-2013 y 2013-2014. El material genético y las frecuencias de riego fueron seleccionados a partir de ensayos preliminares. Se trabajó con *A. cruentus* cv Mexicano y con frecuencias de 7 ,14 y 21 días entre aplicaciones de riego.

### **7.2.1. Diseño experimental**

Durante los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 se evaluó el comportamiento del cultivo en seco. Dado que en la región las precipitaciones durante el mes de diciembre son generalmente escasas, sin aplicación de riego el volumen de agua fue deficitario para el cultivo y en consecuencia muy pocas plantas cumplieron su ciclo. En esos años las lluvias no superaron los 20 mm (Figuras 2.3 y 2.4 del Capítulo 2), situación que se repitió en los años 2012-2013 y 2013-2014. Debido a la reducida disponibilidad de agua durante el mes de diciembre, las parcelas experimentales presentaron elevada pérdida de plantas (>90%) y aquellas que sobrevivieron a esta condición presentaron escaso desarrollo y reducido rendimiento en grano (Anexo). Por esta razón, este ensayo se llevó a cabo durante los ciclos 2012-2013 y 2013-2014 con tratamientos que consistieron en 3 frecuencias de riego: Los primeros 6 riegos se realizaron cada 7 días y luego comenzaron los tratamientos FI cada 7 días, FII cada 14 días y FIII cada 21 días.

En cada año de ensayo se trabajó siguiendo un diseño experimental de 3 bloques con 3 tratamientos de frecuencia de riego, distribuidos al azar dentro de cada bloque. La superficie de cada subparcela o subunidad fue de 21,00 m<sup>2</sup> conformada por 5,00 surcos a lo ancho de 6,00 m de largo, separados entre sí a 0,70 cm.

### 7.2.2. Manejo del cultivo

Previo a la siembra se realizaron muestreos de suelo con el objetivo de determinar las características edáficas del sitio experimental para cada uno de los años de ensayo. El suelo presentó textura franco-arcillosa para ambos años de ensayo (Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal (L.A.S.A. y V.) de la Estación Experimental del Valle Inferior del Río Negro), con propiedades químicas dentro de parámetros normales que lo califican de buena aptitud agrícola (Tabla 7.1).

El manejo general del cultivo se detalló en el capítulo de Materiales y Métodos (Capítulo 2). Las fechas de siembra fueron 2/12/12 y 30/11/13 para cada uno de los años de estudio respectivamente. Las variables meteorológicas de temperatura, precipitaciones y evapotranspiración fueron registradas mediante la estación meteorológica del sitio de estudio (Figuras 2.4 a 2.5 del Capítulo 2).

El cultivo de amaranto requiere de adecuada humedad en el suelo durante la emergencia y los primeros estadios de desarrollo para lograr una buena implantación del cultivo (NRC, 1984; Johnson y Henderson, 2002; Reinaudi *et al.*, 2011). Por esta razón y a partir de los resultados obtenidos en ensayos preliminares sin aplicación de riego se decidió para evitar distorsiones en el ensayo por pérdida de plantas en esta etapa, realizar luego del riego pre siembra riegos de frecuencia semanal hasta los 40 - 45 días después de la siembra en que las plantas alcanzaron un porte aproximado de 35-40 cm y el cultivo se hallaba en inicios del estadio fenológico de panojamiento. Luego de ello, se aplicaron los tratamientos según las frecuencias de riego correspondientes. Esta práctica de efectuar riegos durante los estadios iniciales de cultivo es comúnmente utilizada en el valle de río Negro en el cultivo de maíz (Domínguez *et al.*, 2012, Martínez *et al.*, 2012; Reinoso, 2014).

**Tabla 7.1.** Análisis químico de los suelos utilizados en los ensayos de frecuencia de riego para los diferentes años de estudio.

| Ciclo productivo | Profundidad (cm) | pH   | C.E. (mmhos/cm) | MO (%) | Nt (%) | P Olsen (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------|------|-----------------|--------|--------|--------------------------------|
| 2012-2013        | 0 - 20           | 8,02 | 0,36            | 3,13   | 0,24   | 14,43                          |
|                  | 20 - 40          | 8,17 | 0,42            | 1,30   | 0,19   | 12,81                          |
| 2013-2014        | 0 - 20           | 8,05 | 0,44            | 3,22   | 0,23   | 15,25                          |
|                  | 20 - 40          | 8,30 | 0,53            | 1,09   | 0,12   | 11,52                          |

**Fuente:** Análisis químicos realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Tejido Vegetal (L.A.S.A. y V.) de la Estación Experimental del Valle Inferior del Río Negro. C.E (conductividad eléctrica) y pH, ambos por método potenciométrico, MO: materia orgánica (Walkley y Black), Nt: nitrógeno total (Kjeldhal), P Olsen (fósforo extractable por metodología Olsen, 1954).

El riego se realizó de manera gravitacional por medio de mangas de polietileno de 350 µm de espesor y 30 cm de diámetro con una compuerta por surco. El caudal (Q) utilizado en este ensayo fue de 1.600 mm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> por surco, determinado en forma volumétrica mediante la recolección de agua saliente de la compuerta de la manga con un recipiente de capacidad conocida y medición del tiempo de llenado. Se realizaron 3 repeticiones del procedimiento antes descrito para tomar un valor promedio de caudal mediante la Fórmula 2 utilizada en las prácticas de riego de la EEA Valle Inferior del Río Negro (Fuentes Yangué, 1998).

$$Q = \frac{\text{Volumen de agua recogido (mm}^3\text{)}}{\text{Tiempo de llenado (s)}} = \text{mm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (\text{Fórmula 2})$$

A partir del caudal calculado se decidió trabajar a tiempo fijo para el riego de las parcelas experimentales. El tiempo (t) promedio considerado fue de 4 minutos para todos los tratamientos, tiempo suficiente para cubrir el riego de toda la superficie de la parcela experimental.

La lámina de agua aplicada a las parcelas fue calculada a partir del caudal utilizado y el tiempo de riego mediante cálculo matemático (Fórmula 3) utilizado en las prácticas de riego de la EEA Valle Inferior del Río Negro (Fuentes Yangue, 1998).

$$\text{Lámina de agua aplicada} = \frac{Q (\text{mm}^3 \text{ s}^{-1}) \times t (\text{s})}{L (\text{m}) \times D (\text{m})} = (\text{mm}^3 \text{ m}^{-2}) \quad (\text{Fórmula 3})$$

Donde Q es caudal, t es tiempo de riego, L longitud del surco y D distancia entre surcos.

Durante el año previo al comienzo de los experimentos el suelo donde se instalaron las parcelas experimentales estuvo bajo barbecho. Para determinar los valores de punto de marchitez permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) se tomaron muestras de suelo representativas de los lotes en los que se llevaron a cabo los ensayos a profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm. Las mismas fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la EEA Valle Inferior del Río Negro y los resultados confirmados en el laboratorio de la cátedra de Conservación y Manejo de Suelos del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur. Las determinaciones se realizaron mediante la metodología de Richards (1947) y Klute (1986) con los siguientes resultados: CC: 43,8%; PMP: 21,6%; AU (agua útil: CC – PMP): 22,5%.

Determinar la evolución de la humedad gravimétrica de todos los tratamientos por el método de succión hubiese requerido de un muy elevado número de muestras que dificultaría su procesamiento. Por lo tanto, se realizó un seguimiento de la humedad gravimétrica y, mediante las relaciones entre las propiedades físico-químicas del suelo y el potencial de succión del mismo, denominadas “funciones de edafotransferencia” o “funciones de pedotransferencia” (Gupta y Larson, 1979; Rawls *et al.*, 1982; Kern y Jeffrey, 1995; Bonilla y Cancino, 2001).

El sistema modelo computarizado gráfico según Saxton y Rawls (2006) es la función de pedotransferencia utilizada comúnmente en la EEA Valle Inferior del Río Negro. En ensayos previos se comparó la relación entre los valores de succión medidos en laboratorio y los valores estimados a partir del modelo mencionado. Esta comparación resultó aceptable por lo tanto el cálculo de PMP y CC se realizó con este método a partir de los datos obtenidos de las propiedades físico-químicas del suelo en donde se llevó a cabo el ensayo con los siguientes resultados: PMP 22,00% y CC 42,80%.

Las características de manejo del riego gravitacional utilizado en el Valle Inferior del Río Negro hacen que, en la mayoría de los casos, el agua aplicada supere ampliamente la demanda de la lámina de reposición obtenida mediante parámetros físicos, por lo que de este modo gran parte del agua ingresada al perfil acaba en el sistema de drenaje. Es decir que la tasa de evapotranspiración que determina la demanda neta de agua por lo general es cuantitativamente menor a la lámina bruta aplicada. Por este motivo se consideró que el método de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), el cual tiene en cuenta la evapotranspiración del cultivo (ETc) para el cálculo de la eficiencia de uso de agua (EUA) no reflejaría adecuadamente las variaciones en la cantidad de agua aplicada en función de las frecuencias de riego utilizadas en este ensayo. De igual modo, el hecho de no contar con un ensayo comparativo de producción en condiciones de secano imposibilitó la utilización de la metodología de Qiang descrita anteriormente (Qiang *et al.*, 2014). Por lo tanto, la EUA (Fórmula 4) se determinó matemáticamente como la relación entre el rendimiento en grano obtenido y el total de agua incorporada al cultivo (TAI), para ello se consideró el aporte de agua de riego y de las precipitaciones a lo largo del ciclo productivo (Tanner y Sinclair, 1983; Neluheni *et al.*, 2007; Reinoso, 2014).

$$EUA = \frac{Re \text{ (kg m}^{-2}\text{)}}{TAI \text{ (mm}^3 \text{ m}^{-2}\text{)}} = \text{kg mm}^3 \quad \text{(Fórmula 4)}$$

Donde EUA es la eficiencia de uso de agua, Re rendimiento en grano y TAI es el total de agua ingresada al perfil calculado como la sumatoria de las aplicaciones de riego y el aporte de agua de las precipitaciones.

El último riego en cada tratamiento se efectuó cuando las plantas alcanzaron el 100% de panojamiento y comenzaban a senescer.

### 7.2.3. Datos recolectados.

Durante el transcurso de los ensayos se registró la información correspondiente al momento de finalización de la aplicación del riego, fecha de cosecha y duración total del ciclo. Además durante el desarrollo del ciclo productivo se llevó a cabo el registro de diferentes variables morfofisiológicas: número de hojas visibles a inicio de panojamiento (**HIP**); número máximo de hojas (**MH**); número máximo de nudos (**MN**); número máximo de ramificaciones (**MR**); altura a cosecha (**AC**); longitud de panoja (**Lp**); diámetro del tallo (**ΦT**); número de hojas a cosecha (**HC**); número de ramificaciones a cosecha (**RC**); área foliar a cosecha (**AFC**); peso seco de tallo (**PSt**); peso seco de panoja (**PSp**); peso seco de hojas (**PSh**); peso seco de granos por panoja (**PSgp**); peso de mil granos (**P1000**); peso seco de granos por unidad experimental (**PSgue**); densidad de plantas a cosecha (**Dptc**); y porcentaje de plantas enfermas (**%Pe**) según la metodología detallada en el capítulo 2 de Materiales y Métodos.

Una vez obtenidos los valores de las variables detalladas anteriormente se procedió al cálculo de los siguientes indicadores: relación entre área foliar y número de hojas a cosecha (**AFC/HC**); biomasa aérea de planta (**BApt**); peso seco de la estructura floral (**PSi**); número de granos por panoja (**Ngp**); relación entre número de granos por panoja y peso seco de inflorescencia (**Ngp/PSi**); rendimiento en grano por hectárea o rendimiento económico (**Re**)

expresado como  $\text{Kg ha}^{-1}$ ; densidad de plantas por hectárea (**Dptc ha<sup>-1</sup>**); biomasa aérea por hectárea o rendimiento biológico (**Rb**) expresado en  $\text{Kg ha}^{-1}$ ; e índice de Cosecha (**IC**).

A su vez, durante el desarrollo del ciclo productivo en cada subparcela se identificaron según lo descrito en el capítulo 4 diferentes estadios fenológicos tales como: días a emergencia (**E**); días a inicio de panojamiento (**IP**) y al 100% del mismo (**100%P**); días a inicio de antesis (**IA**) y al 100% de antesis (**100% A**); días a grano lechoso (**GL**); días a grano pastoso (**GP**); madurez fisiológica (**M**).

#### **7.2.4. Análisis estadístico**

A partir de los datos obtenidos se elaboraron tablas que fueron analizadas por medio del programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). A cada variable se le aplicó un ANOVA doble (años x tratamientos) con un diseño en cada año de bloques simples al azar.

Las comparaciones de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años. En la mayoría de los casos (HIP, MH, MN, HC, RC, AFC, AFC/HC, AP, LP,  $\Phi$ T, PSt, PSp, PSgp, Pi, Ngp, Ngp/Pi, P1000, Rb, Re, IC, DPTc, %Pe) no hubo interacción año x tratamiento, sin embargo, cuando existió (MR, PSh, BApt), su  $\text{ETA}^2$  fue despreciable respecto del factor fijo (tratamientos).  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006).

En lo que respecta a la fenología del cultivo los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA). El test de ANOVA se aplicó primeramente a la variable días a madurez del cultivo, dado que la misma representa la totalidad del ciclo productivo de la planta, y se realizó la comparación de medias mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años (Tabla 7.10). A

continuación, el ciclo de crecimiento del cultivo se dividió en 6 periodos (E: emergencia; IP: inicio de panojamiento; IA: inicio de antesis; GL: grano lechoso; GP: grano pastoso; y M: madurez) que fueron analizados mediante el test de ANOVA. En ninguna de las etapas antes mencionadas se detectó interacción con los años por lo que las comparaciones de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de ambos años. Para estos análisis se utilizó el programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008).

### 7.3. Resultados

Durante el transcurso de los ensayos se registró la información correspondiente al momento de finalización de la aplicación del riego, fecha de cosecha y duración total del ciclo. Es importante destacar que el periodo de tiempo entre la suspensión del riego y la cosecha se redujo conforme disminuyó la frecuencia de aplicación de riego como se observa en la Tabla 7.2.

**Tabla 7.2.** Fechas de último riego, cosecha y duración total del ciclo para los distintos tratamientos evaluados en los años de ensayo.

|  | Ciclo productivo | FI   | FII  | FIII |
|--|------------------|------|------|------|
| Fecha del último riego                     | 2012-2013        | 24/2 | 2/3  | 17/2 |
|  | 2013-2014        | 29/2 | 29/2 | 15/2 |
| Fecha de cosecha                           | 2012-2013        | 24/4 | 16/4 | 12/4 |
|  | 2013-2014        | 21/4 | 13/4 | 9/4  |
| Duración total del ciclo de cultivo (días) | 2012-2013        | 144  | 136  | 132  |
|  | 2013-2014        | 143  | 135  | 131  |

FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días

Con el número total de riegos se procedió al cálculo de la lámina de agua aplicada y se contabilizó el aporte de agua de las lluvias durante el ciclo de cultivo, información que permitió conocer el total de agua ingresada (TAI) al perfil de suelo. Así mismo, se determinó a partir de los datos de la casilla meteorológica de la estación experimental del sitio de estudio la evapotranspiración total de cada tratamiento en cada ciclo de cultivo (Tabla 7.3).

**Tabla 7.3.** Número de riegos, lámina de riego aplicada, aporte de lluvia, total de agua ingresada al perfil y evapotranspiración para los distintos tratamientos evaluados en los años de ensayo.

|   | Ciclo productivo | FI      | FII    | FIII   |
|---|------------------|---------|--------|--------|
| Número total de riegos                  | 2012-2013        | 12      | 9      | 7      |
|   | 2013-2014        | 13      | 9      | 7      |
| Lámina de riego aplicada (mm)           | 2012-2013        | 1097    | 823    | 640    |
|   | 2013-2014        | 1189    | 823    | 640    |
| Aporte de lluvia (mm)                   | 2012-2013        | 122,20  | 122,20 | 122,20 |
|   | 2013-2014        | 121,05  | 121,05 | 112,97 |
| Total de agua ingresada al perfil (TAI) | 2012-2013        | 1219,20 | 945,20 | 762,20 |
|   | 2013-2014        | 1310,05 | 944,05 | 752,97 |
| Evapotranspiración (mm)                 | 2012-2013        | 701,66  | 683,30 | 672,12 |
|   | 2013-2014        | 702,45  | 679,56 | 669,08 |

FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días

Los tratamientos de riego utilizados en este ensayo dieron como resultado láminas de agua (TAI) para el ciclo completo del cultivo de valores similares en cada año, la única diferencia hallada se debió a que el tratamiento FI del ciclo 2013-2014 recibió una aplicación más de riego que el ciclo 2012-2013. Por su parte la cantidad de agua de riego aplicada en el tratamiento FII con respecto a FI fue menor (300 mm aprox.) y aun menor respecto de FIII (500 mm aproximadamente).

En relación al aporte de las lluvias, el mismo resultó mayor en el ciclo 2012-2013 aunque las diferencias fueron poco relevantes con respecto al 2013-2014. Este mayor aporte de agua por parte de las precipitaciones permitió al primer ciclo reducir las diferencias en TAI entre los tratamientos FI de los distintos ciclos, aunque las incrementó en los restantes tratamientos. Sin embargo, las diferencias para esta variable entre tratamientos nunca superaron el 10%.

### **7.3.1. Evolución del agua en el suelo.**

#### **7.3.1.1. Tratamiento FI - Riego cada 7 días.**

El día previo al riego programado la humedad gravimétrica del suelo se mantuvo entre el 25 y 27%, y a las 48 horas de efectuado el riego los valores de humedad alcanzaron CC.

#### **7.3.1.2. Tratamiento FII - Riego cada 14 días.**

A partir de los 45 días después de la siembra, cuando el cultivo alcanzó el estado de IP, la frecuencia de riego pasó de 7 días a 14 días (segunda fase). Durante la primer fase de riego, el agua del suelo se mantuvo por sobre PMP. Durante la segunda fase, en cinco oportunidades el agua del suelo, previo al riego, alcanzó valores de humedad gravimétrica de 23% es decir valores mucho menores al 50% de AU. Luego del riego, en mediciones efectuadas a las 48 horas los valores de la humedad volumétrica alcanzaron CC.

#### **7.3.1.3. Tratamiento FIII - Riego cada 21 días.**

Al igual que en el anterior tratamiento durante los primeros 45 días después de la siembra el cultivo se regó cada siete días (primera fase) para luego aplicar una frecuencia de riego de 21 días. Del mismo modo, durante la primer fase la humedad gravimétrica del suelo el día previo al riego se mantuvo por sobre PMP entre 25 y 27%. Por el contrario, en la segunda fase la

humedad del suelo alcanzó valores de 20% de humedad gravimétrica, valores más bajos que en los otros dos tratamientos. Mediciones a las 48 horas de efectuado el riego mostraron valores de humedad en CC, lo que indica, al igual que en los otros tratamientos, que la lámina aplicada fue suficiente en todos los casos.

### 7.3.1. Variables morfofisiológicas

En cuanto al efecto de las frecuencias de riego sobre la morfología de la planta no se hallaron efectos significativos sobre las variables HIP y MN. En MH y MR se observó la tendencia de las mismas a disminuir conforme se redujo la frecuencia de riego, aunque en MH no se detectaron diferencias entre las frecuencias FI y FII (Tabla 7.4).

**Tabla 7.4.** Valores promedio de hojas a inicio de panojamiento, máximo de hojas, nudos y ramificaciones para las diferentes frecuencias de riego ensayadas.

| Variable | F I     | F II    | F III   | F      | <i>p</i> |
|----------|---------|---------|---------|--------|----------|
| HIP      | 17,17 a | 16,86 a | 16,76 a | 1,00   | > 0,05   |
| MH       | 32,52 a | 32,95 a | 30,09 b | 32,42  | < 0,01   |
| MN       | 29,90 a | 31,43 a | 29,88 a | 3,89   | > 0,05   |
| MR       | 7,30 a  | 6,70 b  | 3,40 c  | 243,32 | < 0,01   |

HIP: hojas visibles a inicio de panojamiento, MH: máximo de hojas, MN: máximo de nudos, MR: máximo de ramificaciones, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

De igual modo las variables HC, RC y AFC mostraron una tendencia a reducirse conforme disminuyó la frecuencia de riego (Tabla 7.5) donde el tratamiento FIII fue el cual presentó los menores valores para estas variables. En el caso de AFC no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos FI y FII. Por su parte la relación AFC/HC indicó que el área promedio de cada hoja aumentó a medida que disminuyó la frecuencia de riego.

**Tabla 7.5.** Valores promedio de hojas, ramificaciones, área foliar y relación entre área foliar y número de hojas a cosecha para los diferentes tratamientos de riego ensayados.

| Variable               | F I       | F II      | F III     | F     | <i>p</i> |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|----------|
| HC                     | 23,38 a   | 22,14 b   | 18,43 c   | 85,01 | < 0,01   |
| RC                     | 5,33 a    | 4,81 b    | 3,00 c    | 45,98 | < 0,01   |
| AFC (cm <sup>2</sup> ) | 1348,92 a | 1371,85 a | 1208,86 b | 11,86 | < 0,01   |
| AFC/HC                 | 58,45 c   | 62,28 b   | 66,45 a   | 6,39  | < 0,05   |

HC: hojas a cosecha, RC: ramificaciones a cosecha, AFC: área foliar a cosecha, AFC/HC: relación área foliar a cosecha vs hojas a cosecha, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

Tal como puede observarse en la Tabla 7.6 los valores de AC fueron mayores en el tratamiento FII y disminuyeron en FI y FIII, aunque las diferencias no serían de relevancia agronómica. Por el contrario  $\Phi T$  no se vio afectado por los tratamientos y en el caso de LP no se registró diferencia entre los tratamientos FI y FII.

**Tabla 7.6.** Valores promedio de altura de planta, longitud de panoja y diámetro del tallo a cosecha para los diferentes tratamientos de riego ensayados.

| Variable      | F I      | F II     | F III    | F     | <i>p</i> |
|---------------|----------|----------|----------|-------|----------|
| AC (cm)       | 161,43 b | 163,02 a | 157,95 c | 18,00 | < 0,01   |
| LP (cm)       | 38,88 a  | 38,05 a  | 33,40 b  | 31,19 | < 0,01   |
| $\Phi T$ (cm) | 1,73 a   | 1,73 a   | 1,72 a   | 0,15  | > 0,05   |

AC: altura de planta a cosecha, LP: longitud de panoja,  $\Phi T$ : diámetro del tallo, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

### 7.3.2. Rendimiento y sus componentes

En la Tabla 7.7 se presentan los pesos secos de los órganos aéreos de las plantas. En la mayoría de los casos (PSt, PSh, PSp, PSi, Bapt) se observó que los pesos se redujeron

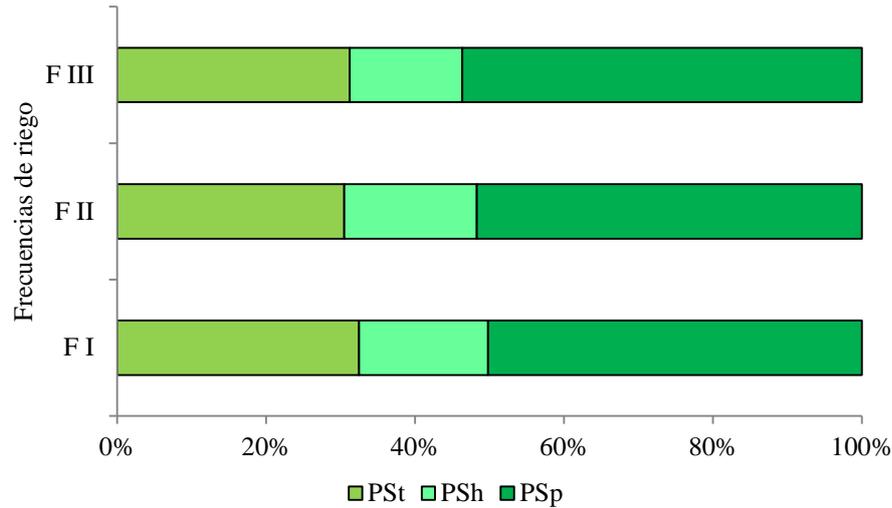
conforme disminuyó la frecuencia de riego, aunque en el caso de los variables PSh y PSp no se detectaron diferencias significativas entre FI y FII pero si respecto de FIII. Las variables PSgp y Ngp alcanzaron los valores máximos en el tratamiento FII y los menores en FIII. Por su parte la variable P1000 no mostró diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de riego aplicados. La relación entre Ngp y PSi mostró que en el tratamiento FII hubo un mayor número de flores por unidad de peso que llegaron a desarrollarse en semillas.

**Tabla 7.7.** Valores promedio de peso seco de tallo, hojas, panoja, granos por panoja, inflorescencia; número de granos por panoja; peso de mil granos; relación entre número de granos por panoja y peso seco de inflorescencia; y biomasa aérea de planta para los diferentes tratamientos de riego ensayados.

|           | F I        | F II       | F III      | F      | <i>p</i> |
|-----------|------------|------------|------------|--------|----------|
| PSt (g)   | 50,20 a    | 45,75 b    | 42,81 c    | 60,55  | < 0,01   |
| PSh (g)   | 26,78 a    | 26,68 a    | 20,70 b    | 270,51 | < 0,01   |
| PSp (g)   | 77,68 a    | 77,60 a    | 73,55 b    | 24,12  | < 0,01   |
| PSgp (g)  | 22,13 b    | 24,29 a    | 19,83 c    | 27,83  | < 0,01   |
| PSi (g)   | 55,55 a    | 53,29 b    | 53,73 b    | 3,44   | < 0,05   |
| Ngp (g)   | 26369,15 b | 28902,16 a | 23651,31 c | 25,99  | < 0,01   |
| Ngp/PSi   | 477,10 b   | 545,04 a   | 442,61 c   | 14,55  | < 0,01   |
| P1000 (g) | 0,84 a     | 0,84 a     | 0,84 a     | 1,61   | > 0,05   |
| BApt      | 156,23 a   | 153,1 b    | 138,64 c   | 184,37 | < 0,01   |

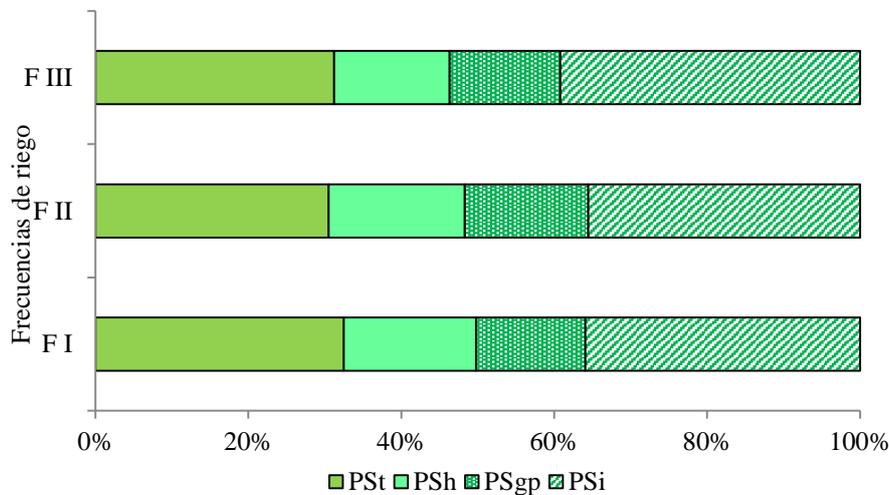
PSt: Peso seco de tallo, PSh: peso seco de hojas, PSp: peso seco de panoja, PSgp: peso seco de granos por panoja, PSi: peso seco de inflorescencia, Ngp: número de granos por panoja, Ngp/PSi: relación entre número de granos por panoja y pesos seco de inflorescencia, P1000: peso de mil granos, BApt: biomasa aérea de planta, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

Resulta interesante destacar que en el caso de Bap, el componente que más aportó a esta variable fue PSp con porcentajes cercanos al 50%, mientras que PSt y PSh representan el 30% y 20% respectivamente (Figura 7.1).



**Figura 7.1.** Representación porcentual de los componentes de la biomasa aérea de planta (Bapt) para las diferentes frecuencias de riego ensayadas. FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días

Al observar que PSp resultó el componente principal de la Bapt se consideró necesario realizar un análisis más descriptivo de sus componentes. Se halló que PSi es el principal representante de esta variable con valores iguales o mayores al 35%, mientras que el PSgp representó alrededor del 15% (Figura 7.2). El porcentaje de PSi tendió a incrementar conforme se disminuyó la frecuencia de riego, mientras que, el porcentaje de PSgp mostró un comportamiento variable que dependió de NGp y no del peso de 1000 granos que fue constante en los tres tratamientos.



**Figura 7.2.** Representación porcentual ampliada de los componentes de la biomasa aérea de planta para las distintas frecuencias de riego ensayadas. FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días

Las restantes variables evaluadas (Tabla 7.8), Rb, Dptc y %Pe, mostraron un comportamiento similar tendiente a reducir sus valores conforme se disminuyó la frecuencia de riego. La variable Dptc juega un rol importante en los valores de Re y Rb, la misma no mostró diferencias estadísticas entre los tratamientos FI y FII, sin embargo, en FIII se manifestó una reducción de este valor.

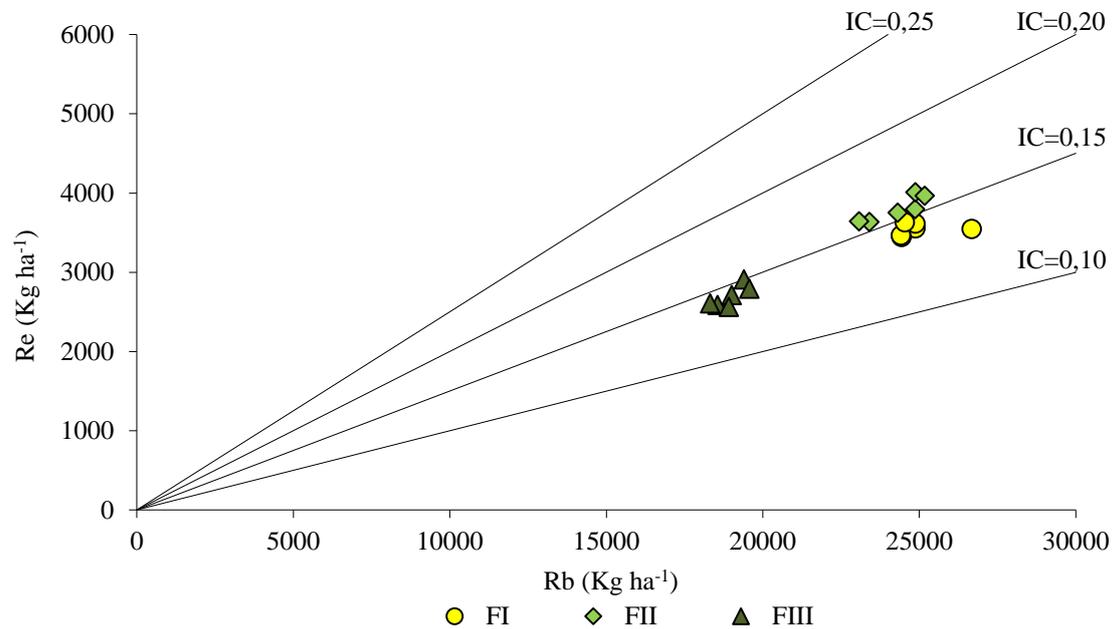
Por su parte, Re mostró un comportamiento con diferencias significativas entre los distintos tratamientos, donde los mayores valores se lograron en FII y los menores en FIII.

**Tabla 7.8.** Valores promedio de rendimiento biológico, rendimiento económico, índice de cosecha, densidad de plantas a cosecha por hectárea y porcentaje de plantas enfermas para los diferentes tratamientos de riego.

| Variabes                    | F I         | F II        | F III       | F      | p      |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------|--------|
| Rb (kg ha <sup>-1</sup> )   | 24966,28 a  | 24283,56 b  | 18957,82 c  | 164,29 | < 0,01 |
| Re (kg ha <sup>-1</sup> )   | 3543,48 b   | 3800,31 a   | 2695,55 c   | 146,31 | < 0,01 |
| IC                          | 0,14 b      | 0,16 a      | 0,14 b      | 12,81  | < 0,01 |
| Dptc (pl ha <sup>-1</sup> ) | 160169,02 a | 158867,48 a | 136826,79 b | 44,54  | < 0,01 |
| %Pe                         | 2,30 a      | 1,40 b      | 0,79 c      | 52,35  | < 0,01 |

Rb: rendimiento biológico, Re: rendimiento económico, IC: índice de cosecha, Dptc: densidad de plantas a cosecha por hectárea, Pe: plantas enfermas, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En relación a la variable IC los mayores valores se lograron en la FII, sin detectar diferencias estadísticamente significativas entre FI y FIII (Tabla 7.8. y Figura 7.3).



**Figura 7.3.** Comportamiento del índice de cosecha y de sus componentes para las diferentes frecuencias de riego ensayadas. Rb: rendimiento biológico, Re: rendimiento económico, IC: índice de cosecha, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días.

La EUA mostró diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos ( $p < 0,01$ , F: 115,54) alcanzó su máximo en el tratamiento FII, mientras que los menores valores de esta variable se lograron en FI (Tabla 7.9).

**Tabla 7.9.** Valores promedio de eficiencia de uso de agua para los diferentes tratamientos de riego utilizados en los ciclos ensayados.

| Variable                  | F I    | F II   | F III  |
|---------------------------|--------|--------|--------|
| EUA (kg m <sup>-3</sup> ) | 2,80 c | 4,02 a | 3,56 b |

EUA: eficiencia de uso de agua, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de la misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

### 7.3.3. Fenología del cultivo

En relación a la fenología del cultivo en los estadios E e IP se observó un comportamiento similar entre tratamientos (Tabla 7.10).

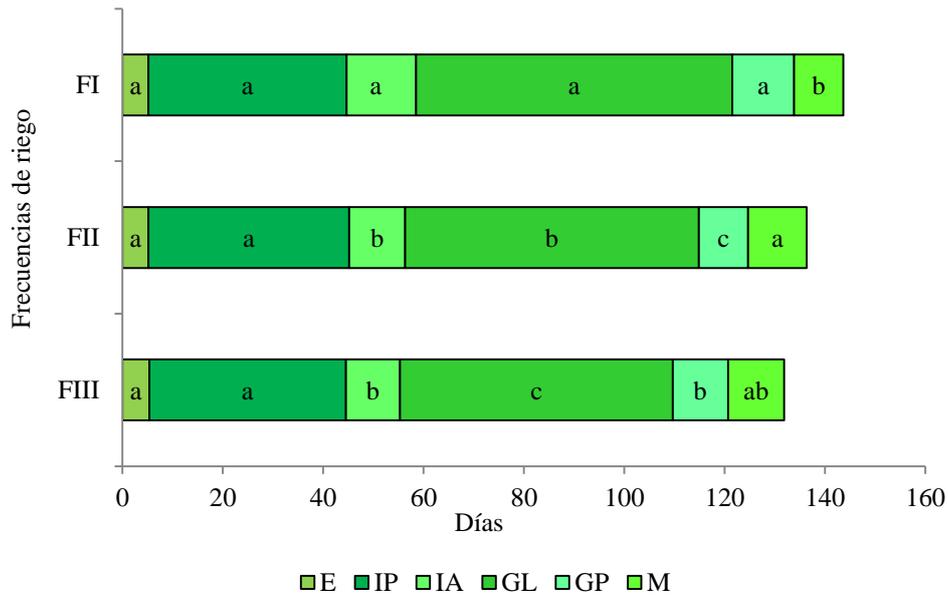
**Tabla 7.10.** Valores promedio en días después de la siembra para las variables fenológicas registradas en los distintos tratamientos de riego durante los ciclos ensayados.

| Tratamiento | E    | IP    | 100% P | IA    | 100% A | GL     | GP     | M        |
|-------------|------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|----------|
| <b>FI</b>   | 5,17 | 44,67 | 96,00  | 58,50 | 108,50 | 121,5  | 133,83 | 143,66 a |
| <b>FII</b>  | 5,17 | 45,17 | 90,83  | 56,33 | 103,50 | 114,83 | 124,67 | 136,33 b |
| <b>FIII</b> | 5,33 | 44,50 | 87,50  | 55,33 | 98,50  | 109,67 | 120,67 | 131,83 c |

FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días, E: emergencia; IP: Inicio de panojamiento, 100%P: 100% de panojamiento, IA: inicio de antesis, 100%A: 100% de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso. M: madurez FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

A partir de los 40 y 45 días después de la siembra, en el estadio de IA, comenzaron a apreciarse diferencias entre las distintas frecuencias de riego ensayadas (Figura 7.4). Sin embargo, fue entre IA y GL donde se manifestó la mayor variación en días entre tratamientos, la cual se mantuvo hasta la madurez del cultivo. FIII fue el tratamiento que presentó la menor longitud de ciclo de cultivo.

En relación a los GDD acumulados hasta maduración se observó una tendencia de los mismos a disminuir conforme se redujo la frecuencia de riegos. Así para FI fue de 1708 GDD, para FII de 1630 GDD y para FIII de 1620 GDD en una secuencia similar a la de días a cosecha (Tabla 7.10). Entre IA y GL se manifestó la mayor reducción.



**Figura 7.4.** Duración en días para los estadios fenológicos del cultivo asociados a las diferentes frecuencias de riego ensayadas. DDS: días después de la siembra; E: emergencia; IP: Inicio de panojamiento, IA: inicio de antesis, GL: grano lechoso, GP: grano pastoso, M: madurez, FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p > 0,05$ ).

#### 7.4. Discusión

Las plantas han evolucionado en respuesta al estrés hídrico mediante adaptaciones morfológicas, anatómicas y fisiológicas que les han permitido crecer y desarrollarse en diferentes grados de escasez de agua, incluso en condiciones de constante déficit (Moreno, 2009). Sin embargo, se puede afirmar que en general cuando no se satisfacen las necesidades de agua de un cultivo, este déficit puede desarrollar un efecto adverso en el crecimiento y rendimiento del mismo (Acevedo *et al.*, 1999 citado por Ejeji y Adeniran, 2010; Igbadun y Oyeboode, 2000; Adeniran, 2004).

Los ensayos preliminares llevados a cabo durante los ciclos 2010-2011 y 2011-2012 y las escasas precipitaciones producidas durante los meses de noviembre y diciembre pusieron de manifiesto que para las condiciones edafoclimáticas del Valle Inferior del Río Negro el cultivo de amaranto requiere de la aplicación de riego para su óptimo desarrollo.

Los tratamientos de riego aplicados en los ensayos de esta tesis no pueden calificarse como “riego deficitario” debido a que no se estableció previamente el estadio de desarrollo más sensible al déficit de agua. En cambio, se aplicaron dos supuestos: que de acuerdo a la literatura y ensayos preliminares el cultivo necesita un riego que asegure que el agua del suelo se mantenga por sobre el nivel del 50% de AU durante los primeros 40-45 día después de la siembra; y que duplicando y triplicando el intervalo de los riegos, el cultivo estaría durante dos o tres cortos lapsos por debajo de estos valores de humedad. Al evaluar la evolución del agua en el suelo en cada tratamiento confirmaron esta suposición que resultó para el tratamiento FII no solo en un aumento del rendimiento sino en un ahorro cercano a los 300 mm de agua de riego.

Entre las frecuencias de riego aplicadas se observó una variación del 2% entre los valores promedio de PMP obtenidos para una profundidad de suelo de 0-40 cm. Todos los ensayos fueron regados semanalmente en la primera fase de los tratamientos lo que probablemente favoreció el desarrollo radicular en los primeros centímetros del suelo, cuando se aplicó la segunda fase de los tratamientos en FII y FIII, al cambiar la dinámica del agua en el suelo, probablemente las raíces desarrollaron en mayor profundidad con el objeto de extraer agua de sustratos de suelo más profundos tal como lo observó Reinoso *et al.*, 2015 para el sitio de estudio.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de esta tesis se observó un evidente efecto de la frecuencia de riego sobre las variables morfofisiológicas del cultivo de amaranto, donde, en la mayoría de los casos (MH, MR, HC, RC, AFC, LP, PSt, PSh, PSp, PSi, Bapt), se aprecia una tendencia a disminuir las mismas conforme se redujo la frecuencia de riego. En el caso del número de hojas y ramificaciones, variables relacionadas a la estructura de la planta, se observó que la disminución en la frecuencia de riego produjo una disminución tanto en el número máximo (MH y MR) como a cosecha (HC y RC). Este comportamiento observado en

MH y HC explicaría los menores valores de AFC hallados en la FIII. Así mismo, la reducción observada en HC explicaría los menores valores de PSh obtenidos, variable que a su vez incide en el comportamiento de Bap<sub>t</sub> y en consecuencia en R<sub>b</sub>.

En caso de HC se hallaron diferencias entre FI y FII, sin embargo la magnitud de las mismas no se manifestó en los valores de AFC. En este sentido varios autores señalan que una disminución en el área foliar es considerada una estrategia adaptativa de las especies que poseen tolerancia al estrés hídrico pese a ello, en ciertas ocasiones puede recuperar su desarrollo rápidamente una vez pasada la condición de estrés (Hsiao, 1973; Hsiao y Acevedo, 1974; Moreno, 2009). A su vez, es importante destacar que si bien HC disminuyó por otra parte la relación AFC/HC aumentó posiblemente debido a que la planta compensó la pérdida de superficie fotosintética con un aumento de tamaño de cada hoja. Zingaretti *et al.*, (2013) han propuesto que el aumento de esta relación puede ser debido al fenómeno de epinastia, que en el caso de las hojas usualmente se observa como una mayor elongación de la porción adaxial (superior) de la hoja respecto a la abaxial (inferior), fenómeno que puede visualizarse en condiciones de estrés hídrico. Este efecto ha sido hallado en el cultivo de amaranto (Jomo *et al.*, 2015).

La reducción observada en HC estuvo asociada con los menores valores de PSh obtenidos, a su vez, incidió en el comportamiento de Bap<sub>t</sub> y en consecuencia en R<sub>b</sub>.

En los ensayos realizados la variable MN no mostró diferencias entre los distintos tratamientos, posiblemente debido a que se trataría de una característica propia del cultivar que no se ve afectada por el estrés de agua. Dado que AC manifiesta una tendencia a reducirse en FIII, podría suponerse que sería la elongación de los entrenudos la que se ve afectada por la disponibilidad de agua. Del mismo modo, en este ensayo el  $\Phi T$  no mostró variaciones asociadas a los tratamientos de riego aunque, se han observado reducciones de esta variable con el incremento del grado de estrés producido (Masariramb *et al.*, 2012).

Los resultados hallados en esta tesis concuerdan con lo encontrado por otros autores en cuanto a reducciones en la altura, número de hojas, área foliar, biomasa y rendimiento de aquellas plantas con tratamientos donde la aplicación de agua se redujo (Neluheni *et al.*, 2007; Masariramb *et al.*, 2012; Chauhan y Abugho, 2013). El momento de floración puede ser afectado por el grado de estrés hídrico, sin embargo, los valores máximos de: área foliar, rendimientos de biomasa y grano han sido logrados con estreses moderados (Olufolaji *et al.*, 2010). En este caso y a partir del estadio de antesis, el amaranto toleró condiciones moderadas de estrés lo que podría ser explicado debido a un mayor desarrollo de raíces (Johnson y Henderson, 2002), o a que el estrés hídrico induciría a un equilibrio más conservador entre los órganos de pérdida de agua y aquellos que absorben (Ferrarotto, 2010). Si bien la muerte y caída de hojas (disminución de HC) redujo el área transpiratoria así como el área fotosintetizante, si las hojas que cayeron fueron las inferiores y/o senescentes, probablemente su efecto fue poco significativo dado que sus tasas de transpiración y fotosíntesis son menores que las de las hojas superiores más jóvenes y más expuestas.

En relación a Bapt y sus componentes (PSt, PSp y PSh) todos mostraron una reducción en FIII. Sin embargo, PSp, principal representante de Bapt, no mostró diferencias significativas entre FI y FII, comportamiento que concuerda con lo observado en Lp. Visto el comportamiento antes detallado de PSp, y dado que P1000 no mostró diferencias asociadas a los tratamientos de riego ensayados, se da por supuesto que fueron sus componentes (PSgp y Ngp) los que mostraron diferencias a favor de FII. Este hecho permite suponer que FI compensa el PSp a través de PSi (variable de mayor valor en FI) y sugiere que FII hace al cultivo más eficiente dado que con menores volúmenes de agua produjo mayor PSgp y Ngp y en consecuencia mayores valores de Re. Una posible explicación a este suceso sería que las plantas del tratamiento FII fueron metabólicamente capaces de soportar por unidad de peso seco de inflorescencia el desarrollo de un mayor número de flores hasta semillas, es decir,

redujeron el número de abortos. Esto hecho concuerda con la explicación propuesta por Dosio *et al.*, (2011) y Oury *et al.*, (2016) de que bajo un moderado estrés de agua las plantas coordinan la disminución del ritmo del crecimiento expansivo y del flujo de fotosintatos, lo que requiere una temprana determinación del aborto de las semillas a fin de evitar el flujo de carbono hacia el resto de los óvulos. Por su parte, Bancal (2008) propone que el estrés de agua resulta en una disminución del rendimiento debido a que durante el período de sequía la planta removiliza tempranamente sus reservas con un posterior desbalance en el metabolismo durante el llenado del grano.

El comportamiento de la variable *Bapt* se vio reflejado en *Rb*, donde al disminuir la frecuencia de riego se también se redujeron los valores de esta variable. Esta respuesta estaría relacionada a la reducción observada en los diferentes componentes de *Bapt* conforme se amplía el periodo entre aplicaciones de riego.

En relación a la variable *Dptc* podría suponerse que la misma incidió en el comportamiento de las variables estudiadas, sin embargo, en *MH*, *AFC*, *LP*, *PSH*, no se hallaron diferencias significativas entre *FI* y *FII*. Esto sugeriría que en esas frecuencias de riego hubo una mayor *EUA* por parte del cultivo, mientras que en el tratamiento *FIII* cuando la restricción hídrica fue mayor la pérdida de plantas fue más elevada lo cual se pudo observar en una menor *Dptc*. Resultados similares a los de esta tesis fueron hallados por Neluheni *et al.*, (2007), donde el tratamiento con mayor aplicación de agua no incrementó en demasía los rendimientos y mostró una menor *EUA* por parte de las especies ensayadas dado que, valores similares de rendimiento se lograron con los tratamientos intermedios con el consecuente ahorro de agua. Así mismo, otro trabajo recomienda riegos que permitan mantener el suelo en condiciones por debajo de capacidad de campo, aunque no menores al 40%, ya que los rendimientos y el desarrollo general del cultivo se verían seriamente afectados por el estrés hídrico (Masariramb *et al.*, 2012).

Durante los primeros estadios de crecimiento de la planta el agua en el suelo juega un papel importante en el desarrollo vegetativo del cultivo que posteriormente influirá en los rendimientos del mismo. Aunque no se conoce la respuesta de este cultivo ante condiciones de estrés severas, a partir del estadio de llenado de grano el amaranto responde a condiciones moderadas de estrés con un aumento del desarrollo radicular que le permite extraer agua a mayores profundidades (Johnson y Henderson, 2002).

Si bien durante los primeros estadios de desarrollo del cultivo todas las frecuencias de riego de este ensayo proveyeron de un adecuado volumen de agua al suelo, el menor aporte de agua suministrado en el tratamiento FII desde el comienzo del estadio IP solo tuvo efectos leves en el desarrollo de la planta. En ese sentido es importante destacar que la formación de la inflorescencia no fue afectada, lo que permitió alcanzar valores de  $R_e$  y  $R_b$  más altos que en el tratamiento FI. En cambio en el tratamiento FIII, al ampliarse el periodo entre cada aplicación de agua, se expuso a la planta a una condición de estrés hídrico más severo, la cual afectó tanto el desarrollo morfofisiológico de la planta como la formación de la inflorescencia que se reflejó en efectos negativos sobre  $R_e$ . Por su parte IC alcanzó los mayores valores en FII, posiblemente debido a que  $R_e$  logró valores más elevados en este tratamiento.

En contraposición a los resultados obtenidos en esta tesis, un estudio realizado con objetivo de analizar la EUA del amaranto en respuesta al estrés hídrico halló en 4 genotipos que ésta no fue afectada ante condiciones de déficit hídrico (Liu y Stützel, 2004). Sin embargo, y en concordancia con los resultados de esta tesis, otros estudios han hallado que la EUA se incrementa en condiciones de déficit hídrico como se observó en el cultivo de soja con moderado déficit de agua en el suelo durante el estadio vegetativo así como en maíz y girasol (Turk y Hall, 1980; Green y Read, 1983).

En relación a la fenología del cultivo se observó el acortamiento del ciclo total del cultivo al disminuir la frecuencia de riego. Esta reducción se evidenció a partir del estadio de antesis

y fue más notoria en el estadio fenológico entre IA y GL. Este efecto posiblemente se asocie tanto con los menores volúmenes de agua recibidos así como, con el comportamiento del estado hídrico del suelo a lo largo del ciclo. En FIII, a diferencia de los restantes tratamientos, se observó para ambos años de estudio dos momentos en los cuales el suelo alcanzó valores próximos PMP. Es importante destacar que el momento fenológico en el que ocurrieron estos eventos de estrés hídrico coincidió para ambos años con los estadios de antesis y llenado de grano, momento de mayor sensibilidad del cultivo, razón que posiblemente explique la pérdida de plantas y la reducción de rendimiento observada. En términos de días la diferencia entre FI y FIII fue de 12 días y de 90 en términos de GDD.

Las plantas presentan dos mecanismos principales de respuesta frente al déficit hídrico, la tolerancia y la evitación o escape (Kramer, 1983, Valladares *et al.*, 2004). Entre las plantas tolerantes se encuentran aquellas que reducen la deshidratación a través de mecanismos morfofisiológicos complejos como: hojas pequeñas y cerosas, estructuras que facilitan la captación del rocío, raíces profundas (plantas freatófitas), reducción del número y tamaño de los estomas, modificación de la estructura del dosel, cambios anatómicos en la epidermis, ubicación de los estomas en cavidades, cutículas gruesas y cerosas en combinación con tejidos suculentos, o metabolismos CAM.

La evitación se entiende como el uso de ciclos de crecimiento muy rápido o de madurez temprana, los cuales permiten el aprovechamiento rápido de la disponibilidad de agua para evitar los periodos de sequía (Kramer, 1983; Valladares *et al.*, 2004). Este último mecanismo podría estar asociado al acortamiento de ciclo o madurez temprana observada en FIII. De igual modo la reducción observada en HC, RC y AFC podría estar asociada a mecanismos de tolerancia de esta especie aunque se requeriría más investigación al respecto.

Los resultados hallados en esta tesis concuerdan con lo observado en un ensayo realizado por Fasinmirin *et al.*, (2009) con *A. cruentus* que alcanzó anticipadamente el estadio de madurez debido al efecto del estrés hídrico producido entre los 50-57 días después de la siembra, es decir entre los estadios vegetativo y floración. Ensayos similares para la misma especie indicaron que la floración es el estadio más sensible al estrés hídrico (Ayodele, 2000; Mlakar *et al.*, 2012). Es así que la bibliografía menciona reducciones en el rendimiento del 19% cuando el déficit hídrico ocurre en floración y del 9% en la formación del grano (Ayodele, 2000). En concordancia con lo antes mencionado en los ensayos de esta tesis las reducciones en rendimiento observadas fueron para FIII del 24% respecto de FI.

### **7.5. Conclusiones**

Se evidencia la tolerancia del amaranto al estrés hídrico el cual, si bien reduce la producción de biomasa y grano, permite obtener destacados rendimientos con una óptima EUA. A su vez, este ensayo deja de manifiesto para el Valle Inferior del Río Negro la necesidad de riego del cultivo durante los primeros estadios de desarrollo.

Se destaca la importancia de evitar situaciones próximas a PMP en el suelo durante el estadio fenológico de anthesis dado que el mismo ocasiona pérdidas de rendimiento de hasta el 29%.

La utilización de una baja frecuencia de riego reduce el ciclo del cultivo lo que permite evitar que la cosecha coincida con el periodo de lluvias de la zona.

Frecuencias de riego más espaciadas en el tiempo generan plantas de menor porte hecho que podría favorecer la cosecha mecánica del cultivo. Así mismo, la incidencia de enfermedades se ve reducida, por lo cual podría ser una estrategia de manejo en cultivares de mayor susceptibilidad a *Macrophoma*.

Por ello, a partir de los resultados obtenidos, la frecuencia de riego más recomendable para la producción en el sitio de estudio es cada 14 días dado que permite alcanzar altos valores de  $R_b$ , los mayores  $R_e$ , y la mejor EUA.

Por otra parte, es importante considerar que el tratamiento en el cual se disminuyó la frecuencia de riego se lograron valores de rendimientos menores pero económicamente viables comparado con la bibliografía existente en producciones de secano.

## **8. CALIDAD NUTRICIONAL**

---

### **8.1. Introducción**

La planta de amaranto puede ser utilizada prácticamente en su totalidad. Es así que los granos se utilizan para consumo humano en Europa, México, Perú, Estados Unidos y algunas regiones de Asia en forma de granos integrales, harina, copos, harina integral de amaranto tostado, amaranto reventado al estilo rosetas, polvo pregel, aceite, barras de cereal, pan de amaranto y como tortilla de amaranto y maíz. La harina generalmente se recomienda para enriquecer pastas, panes, fideos, galletas y alimentos para bebés (Sánchez-Marroquin *et al.*, 1985; Bejosano y Corke, 1998; Juan *et al.*, 2007; Mlakar Grobelnik *et al.*, 2009).

En cuanto al resto de la planta, la hoja de algunas especies de amaranto se consume como hortícola y como forrajera destacándose por contener altos niveles de calcio, hierro, fósforo y magnesio así como ácido ascórbico, vitamina A y fibras (NRC, 1984; Alfaro *et al.*, 1987; Juan *et al.*, 2007). La producción y utilización del amaranto como forraje se destaca por presentar altos niveles de proteína que varían entre 13 y 27% (Brenner *et al.*, 2000; Sleugh *et al.*, 2001; Troiani y Ferramola, 2005; Mapes Sánchez y Espita, 2010; Seguin *et al.*, 2013). Kaul *et al.*, (1996) recomiendan para la producción de forraje genotipos de alto rendimiento en biomasa con elevado porcentaje de hoja. A su vez, Stordahl *et al.*, (1999), Sleugh *et al.*, (2001); Pospisil *et al.*, (2009); Philippe *et al.*, (2013) mencionan que la calidad del forraje está sujeta al estado de desarrollo del amaranto. En estadios cercanos a la madurez del cultivo la calidad nutricional disminuye debido al incremento de la fracción fibra y a la reducción del contenido de proteína. Estos autores hallaron valores de proteína del 23% para el estado vegetativo y del 13% en estadios más avanzados del ciclo del cultivo, donde la concentración de FDN y FDA se incrementó en el tallo. Otros autores (Sleugh *et al.*, 2001, Písaříková *et al.*, 2007; Rezaei *et al.*, 2009) destacan el importante valor nutricional del forraje de amaranto debido a los altos

porcentajes de proteína cruda (8-29%), bajos valores de lignina (1,7-7,3%) y alta digestibilidad *in vitro* (59-79%).

El amaranto cultivado para grano, técnicamente es considerado un pseudocereal dado que tiene características similares a los granos de cereales verdaderos de las monocotiledóneas. Sin embargo, por ser una dicotiledónea no es considerado como un cereal verdadero (Becerra, 2000; Juan *et al.*, 2007). Según Irving *et al.* (1981), la semilla de amaranto madura contiene cantidades importantes de almidón, pero a diferencia de los cereales este se encuentra almacenado en el perispermo, que ocupa gran parte del centro del grano, mientras que el embrión y los restos del endosperma asociados al embrión son una buena fuente de lípidos y proteínas.

Los análisis de composición nutricional de este cultivo indican que los valores de proteína cruda, grasa, fibra y cenizas son por lo general más elevados que los obtenidos en los cereales por lo que, el contenido de carbohidratos es menor (Betschart *et al.*, 1979; Saunders y Becker, 1984; Singhal y Kulkarni, 1988; Juan *et al.*, 2007). Los valores de cenizas presentes en esta planta son elevados dado que esta especie se caracteriza por tener alto contenido de minerales (Bertoni y Cattaneo, 1987).

Del total del grano, aproximadamente el 17% representa las proteínas de reserva, aunque su importancia no radica en la cantidad de esta fracción sino en la calidad de la misma. Numerosos autores mencionan que el grano de amaranto presenta valores de proteína del 12 al 19% con un adecuado balance de aminoácidos (Downton, 1973; Betschart *et al.*, 1979; Aguilar y Alatorre, 1978; Singhal y Kulkarni, 1988; Bressani, 1989; Lehmann, 1990; Barba de la Rosa *et al.*, 1992; Segura Nieto *et al.*, 1992; William y Brenner, 1995; Barba de la Rosa, 2007).

La proteína del amaranto en su composición es similar a la leche vacuna y se aproxima a la proteína ideal propuesta por FAO para la alimentación humana. Tiene un contenido importante de lisina, metionina y arginina aminoácidos por lo general limitantes en otros cereales

(Venskutonis *et al.*, 2013). A su vez, presenta bajo contenido de leucina lo cual no resulta una limitante dado que este aminoácido se encuentra en exceso en la mayoría de los granos. Por lo tanto, podría existir una complementación entre los aminoácidos esenciales del amaranto y los presentes en otros cereales (Breener, 1991; Segura Nieto *et al.*, 1994).

De acuerdo con la clasificación de Osborne las proteínas de reserva del amaranto están constituidas mayoritariamente por albúminas, globulinas y glutelinas. Las dos últimas constituyen las principales proteínas de reserva del grano las cuales se encuentran localizadas en el embrión y en el endosperma. Respecto a la fracción globulinas participan de la misma, las globulinas de reserva clásicas de muchos granos tipo 7S (minoritaria desde el punto de vista cuantitativo) y 11S y las globulinas-P, características del amaranto (Segura-Nieto *et al.*, 1994, Romero-Zepeda y Paredes-López, 1996; Chen y Paredes-López 1997; Castellani *et al.*, 1998, 1999). Los granos de amaranto son calificados como “libre de gluten” en la medida que si bien tiene glutelinas no contiene gliadinas que son ricas en ácido glutámico (que da nombre al “gluten”) y prolina. Sin embargo, puede contener una porción potencialmente tóxica intestinal para niños y adultos genéticamente sensibles a ella. A pesar de ello, esta porción gliadínica de acción tóxica directa o indirecta (inhibitoria), sólo es activa si se encuentra formando gluten (Parada y Araya, 2010).

La proteína que se encuentra ligada a la pared celular toma la característica de “proteína pasante”, de gran importancia para alimentación de rumiantes (Cheeke y Bronson, 1979 citado por Sleugh *et al.*, 2001). Otro autor destaca los altos contenidos de proteína y los bajos valores de lignina, nitratos y ácido oxálico (Rezaei *et al.*, 2009). Estos dos últimos son factores anti-nutricionales al igual que los alcaloides, compuestos cianogénicos, saponinas, inhibidores de tripsina y taninos. Todos estos se encuentran en valores similares a los encontrados en legumbres y otros granos no considerándose de riesgo nutricional. La acumulación de nitratos

suele alcanzar niveles similares a los encontrados en espinaca y para el consumo humano basta con someter las hojas a un hervor para removerlos en su mayoría (NRC, 1984).

El contenido de minerales de las semillas de amaranto suele variar entre las distintas especies, a pesar de ello, supera notoriamente a otros cereales concentrándose éstas en el germen y la cáscara (Becker *et al.*, 1981; Betschart *et al.*, 1981; Saunders y Becker, 1984; Singhal y KulKarni, 1988).

Los sistemas de producción ganadera de nuestro país se basan en el pastoreo directo de los recursos forrajeros, con ocasional uso de suplementos tales como granos, subproductos de cosecha, y/o forrajes conservados como heno o silaje. El forraje base y los suplementos varían en su calidad a lo largo del año en función de la especie, época del año, estado fisiológico, tipo y cantidad de fertilizante aplicado, momento de corte o de pastoreo, entre otros factores. Analizar los alimentos es importante para caracterizar nutricionalmente los mismos y para seleccionar mejor los suplementos a utilizar para optimizar la producción (Colombatto, 2000).

En general, los vegetales que se ofrecen para pastoreo contienen entre 70 y 80% de agua, los silajes entre 60 y 70%, y las semillas, henos y muchos subproductos industriales (afrechillos, expelers) contienen de 8 a 12%. Una vez quitado el agua del alimento, se obtiene la materia seca que contiene los nutrientes que serán aprovechados por el animal: hidratos de carbono, proteínas, lípidos y minerales (Cherney, 2000).

Las *cenizas* de un alimento es un término analítico con el que se denomina al residuo inorgánico que queda después de calcinar la materia orgánica. Las cenizas debido a las pérdidas por volatilización o a las reacciones químicas entre los constituyentes, en general no son las mismas sustancias inorgánicas presentes en el alimento original (Pearson, 1993).

La *fibra detergente neutro* (FDN) es el residuo remanente después de una solubilización del alimento en detergente neutro. Está compuesta por hemicelulosa, celulosa, lignina, cenizas y proteína ligada, y por esto ha sido comparada con el término “pared celular”. Sin embargo, esta relación no es tal, dado que la pared celular es una estructura biológica muy compleja (Jung y Allen, 1995). De todas las fracciones fibrosas, FDN es la que mejor se correlaciona con el consumo voluntario.

La *fibra en detergente ácido* (FDA) es el residuo remanente de la solubilización del alimento en detergente ácido. Este detergente provoca, además de la solubilización de los mismos componentes que el detergente neutro, la solubilización de la hemicelulosa (Weiss, 1994).

Las ligninas, compuestos polímeros fenólicos reticulados, son particularmente importantes en la formación de las paredes celulares, por lo que resulta conveniente utilizar el término *lignina* en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal, frecuentemente mencionada como limitante de la digestión de la fibra, y en ocasiones de la proteína. Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que el contenido de lignina *per se* no sería responsable de la disminución de la digestión de la fibra, sino que la acción de la lignina consistiría en reducir el acceso de las enzimas hidrolíticas a la fibra digestible (Jung y Allen, 1995). La importancia de conocer la concentración de lignina de un alimento reside en su relación aparente con la *digestibilidad* de ese alimento (Cherney, 2000). En general, a medida que avanza el estado fenológico de un forraje, aumenta la concentración de lignina.

Los animales requieren nitrógeno en la forma de aminoácidos. El animal puede sintetizar aproximadamente la mitad de los aminoácidos necesarios, el resto debe proveerse como componentes de la dieta (aminoácidos esenciales), sintetizados por las plantas a partir del nitrógeno inorgánico. El principio básico para estimar la proteína de una muestra a partir de la

determinación de N por el método de Kjeldahl es que las proteínas contienen en promedio un 16% de N (Maiztegui, 2008).

Un ensayo en el cual se evaluó la calidad nutricional en forraje de *Amaranthus hypochondriacus* con diferentes manejos arrojó en promedio valores de: proteína cruda de 14,8%, FDN de 46,4%, FDA de 28,8 %, LDA de 4,6%, cenizas de 13,9% (Abbasi *et al.*, 2012). Trabajos realizados en *A. cruentus* evaluaron la calidad nutricional de biomasa en función del momento de cosecha y mostraron valores entre 38-47% de FDN, 26-35% de FDA, 4-7,5% de LDA y de 10-14% de PB a los 110-120 días después de la siembra (Sleugh *et al.*, 2001; Písaříková *et al.*, 2007; Pospisil *et al.*, 2009; García-Pereyra *et al.*, 2009). Otros autores hallaron valores entre 2,5-5,6 % de PB y 51,1-67,5% de FDN para tallo y para hoja entre 8,0-16,3% de PB y 27,2-41,0% de FDN (Riveros y Cristi, 1988).

El cultivo de amaranto es utilizado mundialmente tanto para grano como para producción hortícola y forrajera, los anteriores ensayos que componen esta tesis fueron dirigidos hacia la producción de grano. En cambio los resultados obtenidos en este capítulo y su discusión se centran principalmente en como las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso productivo podrían modificar desde el punto de vista de la nutrición animal aspectos relacionados con la calidad de las diferentes fracciones de la planta. Algunos autores hacen referencia a la incidencia de la especie, la fecha de siembra y la fertilización nitrogenada en la calidad del cultivo (Sleugh *et al.*, 2001; Písaříková *et al.*, 2007; Abbasi *et al.*, 2012). Complementariamente a los resultados de la calidad nutricional del grano se muestran los resultados de calidad forrajera (fracción aérea) como subproducto de cosecha del cultivo de cada ensayo.

## **8.2. Materiales y métodos**

Las determinaciones de calidad realizadas en este capítulo se efectuaron sobre materiales del ensayo de “Fechas de siembra y genotipos” (Capítulo 3) durante los ciclos productivos 2010-2011; 2011-2012; 2012-2013 y de los ensayos de “Fertilización nitrogenada” (Capítulo 5), “Densidad de plantas” (Capítulo 6), y “Frecuencias de riego” (Capítulo 7), durante los ciclos productivos 2011-2012 y 2012-2013.

Para cada ensayo se tomaron muestras representativas de grano, hoja y tallo al momento de cosecha. Las mismas se acondicionaron para luego realizar las determinaciones de calidad nutricional. Para ello, el material recolectado se secó en estufa a 60°C con ventilación forzada hasta peso constante y se procesó a través de un molino estacionario Thomas-Wiley con una criba de un 1 mm.

### **8.2.1. Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado es el detallado en cada uno de los capítulos antes descritos, con excepción del ensayo de fechas de siembra y genotipos donde se analizó solo el material genético *A. cruentus* cv Mexicano seleccionado por la consistencia de su comportamiento en función del tiempo a las condiciones edafoclimáticas del sitio de estudio. En este caso, el análisis se realizó como un diseño en bloques repetidos en 3 años en unidades experimentales diferentes.

### **8.2.2. Datos recolectados**

Las muestras obtenidas de grano, hoja y tallo fueron procesadas en laboratorio para determinar las variables: cenizas (Cen), fibras (FDN, FDA y LDA), proteína (PB) y digestibilidad (DMS) en valores porcentuales sobre base seca para cada una de las secciones (Tabla 8.1).

**Tabla 8.1.** Metodología para la determinación de variables asociadas a la calidad nutricional de tallo, hoja y grano.

| Variable                          | Notación | Método de determinación  |
|-----------------------------------|----------|--|
| Materia seca*                     | MS       | Secado en estufa a 105°C con ventilación forzada hasta peso constante (AOAC, 1990).                        |
| Cenizas                           | Cen      | Incineración completa en mufla a 500°C (AOAC, 1990).   |
| Fibra detergente neutro           | FDN      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM.                   |
| Fibra detergente ácido            | FDA      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM.                   |
| Lignina detergente ácido          | LDA      | Método secuencial de detergentes (Van Soest <i>et al.</i> , 1991), por tecnología ANKOM.                   |
| Proteína bruta                    | PB       | Nitrógeno total por Kjeldhal (AOAC, 1990), equipo Kjeltec 2300 (semi – micro). Factor de corrección: 6,25. |
| Digestibilidad de la materia seca | DMS      | Cálculo matemático por Ecuación Rohweder, 1978   |

\*Valor considerado para expresar las diferentes variables sobre base seca.

Para la evaluación de calidad de forraje de estos ensayos se analizaron las secciones de tallo y hoja por separado, por lo cual fue necesario realizar una ponderación de ambas fracciones por la biomasa relativa de cada una de ellas en cada variable de calidad estudiada para poder comparar los resultados con la bibliografía disponible en la temática.

En un primer paso se calcula un coeficiente que expresa cuanto representa hoja o tallo en la biomasa constituida por ambos (Fórmula 1):

$$C_H = \frac{PS_H (g)}{PS_H (g) + PS_T (g)} \quad (\text{Fórmula 1})$$

$$C_T = 1 - C_H \quad (\text{Fórmula 2})$$

Donde  $C_H$  es coeficiente para ponderar los valores de calidad hallados en las hojas, y su complemento  $C_T$  para ponderar los valores de calidad hallados en tallo,  $PS_H$  es peso seco de hojas,  $PS_T$  es peso seco de tallos.

Luego se ponderan los resultados correspondientes a cada variable de calidad de tallo y hoja a partir de los coeficientes calculados previamente para la estimación de la *calidad del forraje* (Fórmula 3):

$$\text{Forraje} = \text{VC}_H \times C_H + C_T \times \text{VC}_T \quad (\text{Fórmula 3})$$

Donde VC es la variable de calidad estudiada para hoja ( $\text{VC}_H$ ) y tallo ( $\text{VC}_T$ ).

### 8.2.3. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados a través del programa estadístico INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2008). A cada variable se aplicó un ANOVA doble (años x tratamientos) con un diseño en cada año de bloques simples al azar.

En la mayoría de las variables de calidad estudiadas para las secciones de grano, hoja y tallo de los diferentes tratamientos el test de ANOVA detectó interacción con los años, sin embargo, la misma no invalidó el evidente efecto de los tratamientos, dado que en todos estos casos el  $\text{Eta}^2$  fue mayor al 50%.  $\text{ETA}^2$  se define como la proporción de la varianza asociada o explicada por cada uno de los efectos principales, interacciones, y/o errores en un análisis de ANOVA (Thompson, 2006).

Las comparaciones de a pares de medias se realizaron mediante diferencia mínima significativa de Fisher (DMS) al 5% con los promedios de los años.

## 8.3. Resultados.

### 8.3.1. Calidad nutricional del grano

#### 8.3.1.1. Fechas de siembra

A partir de los resultados de laboratorio y del análisis estadístico realizado se evaluó el efecto de las fechas de siembra sobre las variables estudiadas (Tabla 8.2). Para el contenido de

FDN y FDA se observó una tendencia a disminuir conforme se retrasó la fecha de siembra con diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ). En el caso de PB el comportamiento fue el opuesto al mencionado anteriormente, es decir el contenido de la fracción proteica se incrementó conforme se efectuaron siembras tardías con diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre los tratamientos. Sin embargo, la magnitud de estas diferencias es pequeña por lo que podrían considerarse poco relevante agronómicamente. Por su parte, los contenidos de LDA, Cen no mostraron diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) asociadas a las fechas de siembra estudiadas.

En relación a la DMS, los mayores valores se hallaron en la tercera y cuarta fecha de siembra, sin diferencias entre sí.

**Tabla 8.2.** Calidad nutricional del grano para las diferentes fechas de siembra evaluadas.

| Variable | Fechas de siembra |         |         |         | F      | p     |
|----------|-------------------|---------|---------|---------|--------|-------|
|          | F1                | F2      | F3      | F4      |        |       |
| FDN (%)  | 18,29 a           | 18,24 b | 18,22 c | 18,17 d | 33,70  | <0,01 |
| FDA (%)  | 7,34 a            | 7,32 a  | 7,25 b  | 7,23 b  | 27,40  | <0,01 |
| LDA* (%) | 4,23 a            | 4,23 a  | 4,24 a  | 4,25 a  | 50,25  | >0,05 |
| Cen (%)  | 2,24 a            | 2,24 a  | 2,26 a  | 2,25 a  | 1,46   | >0,05 |
| PB*(%)   | 17,30 d           | 17,60 c | 17,65 b | 17,83 a | 628,20 | <0,01 |
| DMS (%)  | 82,72 b           | 82,74 b | 82,79 a | 82,80 a | 32,47  | >0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

### 8.3.1.2. Fertilización nitrogenada

Al evaluar el efecto de la fertilización (Tabla 8.3) en la fracción fibra se observó que los valores de FDN, FDA, y LDA no mostraron diferencias estadísticas significativas asociadas a los tratamientos ( $p > 0,05$ ). Un comportamiento opuesto al antes descrito se observó en las variables Cen y PB, las cuales incrementaron conforme aumentó la dosis de fertilización. En la fracción PB no se hallaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de 150 y 300 kg N ha<sup>-1</sup>. En relación a DMS no se hallaron diferencias estadísticas ( $p > 0,05$ ) entre tratamientos.

**Tabla 8.3.** Calidad nutricional del grano para las diferentes dosis de fertilización evaluadas.

| Variable | Dosis de fertilización (kg N ha <sup>-1</sup> ) |         |         |         |         | F       | p     |
|----------|---|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
|          | 0   | 50      | 100     | 150     | 300     |         |       |
| FDN (%)  | 16,22 a   | 16,40 a | 16,34 a | 16,27 a | 16,09 a | 1,62    | >0,05 |
| FDA (%)  | 7,54 a  | 7,58 a  | 7,54 a  | 7,47 a  | 7,45 a  | 2,20    | >0,05 |
| LDA* (%) | 4,37 a  | 4,38 a  | 4,36 a  | 4,36 a  | 4,34 a  | 0,23    | >0,05 |
| Cen* (%) | 2,24 d  | 2,24 d  | 2,27 c  | 2,33 b  | 2,37 a  | 214,62  | <0,01 |
| PB (%)   | 16,19 d   | 17,27 c | 18,70 b | 19,80 a | 19,72 a | 2251,87 | <0,01 |
| DMS (%)  | 82,57 a   | 82,54 a | 82,57 a | 82,62 a | 82,64 a | 2,22    | >0,05 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

### 8.3.1.3. Densidades de plantas

Al evaluar el efecto de la densidad de siembra en las variables de calidad analizadas se encontró para FDN, FDA y LDA diferencias estadísticamente altamente significativas ( $p < 0,01$ )

asociadas a los tratamientos, mostrándose un comportamiento de las mismas tendiente a incrementar conforme se aumentó la densidad de siembra (Tabla 8.4).

En el caso particular de las variables Cen, PB y DMS se hallaron diferencias estadísticas entre los distintos tratamientos con un comportamiento tendiente a disminuir conforme se incrementó la densidad de siembra.

**Tabla 8.4.** Calidad nutricional del grano para las diferentes densidades de siembra evaluadas.

| Variable | Densidad de plantas |          |          |         |         |         |         | F      | p     |
|----------|---------------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
|          | S72                 | S110     | S143     | D86     | D143    | D286    | D572    |        |       |
| FDN*(%)  | 16,42 d             | 16,95 c  | 17,01 c  | 16,42 d | 17,14 b | 17,24 a | 17,27 a | 183,00 | <0,01 |
| FDA*(%)  | 7,30 e              | 7,40 d   | 7,50 c   | 7,38 d  | 7,60 b  | 7,62 b  | 7,67 a  | 134,77 | <0,01 |
| LDA*(%)  | 3,70 f              | 4,28 d   | 4,29 d   | 4,17 e  | 4,34 c  | 4,38 b  | 4,45 a  | 301,51 | <0,01 |
| Cen (%)  | 2,42 ab             | 2,31 b   | 2,42 ab  | 2,51 a  | 2,34 b  | 2,32 b  | 2,32 b  | 2,90   | <0,05 |
| PB*(%)   | 17,91 b             | 17,88 bc | 17,83 bc | 18,01 a | 17,82 c | 17,66 d | 17,61 d | 40,48  | <0,01 |
| DMS*(%)  | 82,76 a             | 82,68 b  | 82,60 c  | 82,69 b | 82,52 d | 82,50 d | 82,47 e | 130,66 | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

#### 8.3.1.4. Frecuencias de riego

A partir de los análisis realizados se observó que FDN, FDA, LDA y Cen mostraron un patrón tendiente a disminuir sus valores conforme se redujo la frecuencia de riego con diferencias estadísticas entre tratamientos (Tabla 8.5).

**Tabla 8.5.** Calidad nutricional del grano para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.

| Variable | Frecuencias de riego |         |         | F       | p     |
|----------|----------------------|---------|---------|---------|-------|
|          | I                    | II      | III     |         |       |
| FDN*(%)  | 16,59 a              | 16,47 b | 15,55 c | 1690,69 | <0,01 |
| FDA (%)  | 7,48 a               | 7,44 b  | 7,38 c  | 27,14   | <0,01 |
| LDA (%)  | 4,27 a               | 4,26 ab | 4,22 b  | 4,54    | <0,05 |
| Cen*(%)  | 2,85 a               | 2,58 b  | 2,33 c  | 359,50  | <0,01 |
| PB (%)   | 18,37 b              | 18,43 a | 18,47 a | 12,26   | <0,05 |
| DMS*(%)  | 82,61 c              | 82,64 b | 82,69 a | 30,64   | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En el caso de PB se observó una tendencia a incrementar conforme se redujo la frecuencia de riego con diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ). A pesar de ello, no se hallaron diferencias estadísticas entre las frecuencias II y III.

DMS aumentó conforme se redujo la frecuencia de riego con diferencias estadísticas entre tratamientos altamente significativas ( $p < 0,01$ ). Sin embargo, las diferencias halladas en todas las variables estudiadas son de pequeña magnitud por lo que podrían considerarse poco relevantes agronómicamente.

### 8.3.2. Calidad nutricional del forraje

Como se mencionó anteriormente la bibliografía disponible en la temática hace referencia como calidad de forraje a valores que comprenden la fracción tallo y hoja en su conjunto dado que el uso de las mismas se puede considerar como una actividad complementaria a la cosecha de grano. Por lo tanto, y tal como se explicó en la sección 8.2.2. de Materiales y Métodos de este capítulo, en estos ensayos se muestrearon y analizaron las hojas y tallos de la planta por separado y luego, se aplicó la metodología descrita en la misma sección.

### 8.3.2.1. Fechas de siembra

A partir de los resultados de laboratorio y del análisis estadístico realizado se evaluó el efecto de las fechas de siembra en las variables estudiadas para hoja y tallo (Tabla 8.6). Para FDN, FDA, LDA y Cen de ambas secciones se observó una tendencia a disminuir conforme se retrasó la fecha de siembra con diferencias altamente significativas ( $p < 0,01$ ). En PB y DMS se observó la tendencia de las mismas a incrementar con fechas tardías, hallándose diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre fechas.

Es importante destacar que si bien se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre fechas para las diferentes variables analizadas, la magnitud de las mismas podría considerarse poco relevante agronómicamente.

**Tabla 8.6.** Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes fechas de siembra evaluadas.

| Sección | Variable | Fechas de siembra |         |         |         | F      | p     |
|---------|----------|-------------------|---------|---------|---------|--------|-------|
|         |          | F1                | F2      | F3      | F4      |        |       |
| Hoja    | FDN*(%)  | 45,57 a           | 45,18 b | 44,31 c | 44,16 c | 33,16  | <0,01 |
|         | FDA*(%)  | 15,51 a           | 15,07 b | 14,89 c | 14,65 d | 44,90  | <0,01 |
|         | LDA*(%)  | 4,34 a            | 4,32 ab | 4,30 b  | 4,28 c  | 14,10  | <0,01 |
|         | Cen*(%)  | 22,80 a           | 22,49 b | 22,30 c | 21,35 d | 258,25 | <0,01 |
|         | PB (%)   | 15,10 c           | 15,17 b | 15,31 a | 15,37 a | 22,26  | <0,01 |
|         | DMS (%)  | 76,40 d           | 76,74 c | 76,88 b | 77,07 a | 44,36  | <0,01 |
| Tallo   | FDN*(%)  | 64,10 a           | 63,77 b | 63,35 c | 62,67 d | 287,64 | <0,01 |
|         | FDA*(%)  | 43,60 a           | 43,57 a | 43,40 b | 43,26 c | 106,67 | <0,01 |
|         | LDA (%)  | 5,37 a            | 5,35 a  | 5,23 b  | 5,15 c  | 15,31  | <0,01 |
|         | Cen*(%)  | 15,71 a           | 15,62 b | 15,43 c | 15,23 d | 92,30  | <0,01 |
|         | PB* (%)  | 3,84 d            | 4,07 c  | 4,12 b  | 4,23 a  | 275,08 | <0,01 |
|         | DMS*(%)  | 54,67 c           | 54,70 c | 54,83 b | 54,93 a | 107,79 | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En relación con la calidad del forraje (Tabla 8.7) el comportamiento del cultivo en FDN, LDA y Cen disminuyó con el retraso de las fechas de siembra. FDA presentó, respecto de las fechas, variabilidad en sus valores.

**Tabla 8.7.** Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes fechas de siembra evaluadas.

| Variable | Fechas de siembra |          |         |         | F      | p     |
|----------|-------------------|----------|---------|---------|--------|-------|
|          | F1                | F2       | F3      | F4      |        |       |
| FDN*(%)  | 58,02 a           | 58,30 a  | 58,37 a | 56,26 b | 24,170 | <0,01 |
| FDA*(%)  | 34,37 b           | 35,17 ab | 35,91 a | 33,36 c | 14,46  | <0,01 |
| LDA*(%)  | 5,03 ab           | 5,05 a   | 4,99 b  | 4,83 c  | 26,20  | <0,01 |
| Cen*(%)  | 18,04 a           | 17,64 b  | 17,23 c | 17,34 c | 35,36  | <0,01 |
| PB (%)   | 7,54 c            | 7,34 bc  | 7,05 b  | 8,09 a  | 14,97  | <0,01 |
| DMS*(%)  | 61,81 b           | 61,19 bc | 60,62 c | 62,59 a | 14,55  | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. F1: 1° fecha de siembra, F2: 2° fecha de siembra; F3: 3° fecha de siembra; F4: 4° fecha de siembra. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

PB y DMS mostraron un comportamiento tendiente a incrementar con siembras tardías con diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre tratamientos.

### 8.3.2.2. Fertilización nitrogenada

Al evaluar el efecto de la fertilización en la fracción fibra se observó que los valores de FDN, FDA y LDA se reducían en hoja, tallo y forraje al aumentar la dosis de fertilización, hallándose diferencias estadísticas asociadas a los tratamientos. Un comportamiento opuesto al antes descrito se observó en Cen, PB y DMS las cuales incrementaron conforme aumentó la dosis de fertilización (Tabla 8.8 y Tabla 8.9).

**Tabla 8.8.** Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes dosis de fertilización evaluadas.

| Sección | Variable | Dosis de fertilización (kg ha <sup>-1</sup> ) |          |           |          |          | F     | p     |
|---------|----------|---|----------|-----------|----------|----------|-------|-------|
|         |          | 0   | 50       | 100       | 150      | 300      |       |       |
| Hoja    | FDN (%)  | 44,86 a                                       | 43,56 b  | 43,48 bc  | 43,10 cd | 42,80 d  | 35,99 | <0,01 |
|         | FDA (%)  | 15,50 a                                       | 15,38 a  | 15,14 b   | 15,12 b  | 14,95 b  | 10,51 | <0,05 |
|         | LDA (%)  | 4,42 a  | 4,44 a   | 4,29 b    | 4,24 bc  | 4,16 c   | 15,64 | <0,01 |
|         | Cen*(%)  | 23,15 e                                       | 23,21 d  | 23,39 c   | 23,49 b  | 23,57 a  | 99,22 | <0,01 |
|         | PB*(%)   | 13,26 e                                       | 13,89 d  | 15,32 c   | 16,40 b  | 17,30 a  | 5354  | <0,01 |
|         | DMS*(%)  | 76,41 b                                       | 76,50 b  | 76,69 a   | 76,70 a  | 76,84 a  | 10,47 | <0,01 |
| Tallo   | FDN*(%)  | 60,67 a                                       | 60,11 b  | 59,83 bc  | 59,78 c  | 59,18 d  | 31,29 | <0,01 |
|         | FDA (%)  | 45,54 a                                       | 45,36 ab | 45,01 bc  | 44,74 c  | 44,67 c  | 5,33  | <0,05 |
|         | LDA (%)  | 5,44 a  | 5,45 a   | 5,37 ab   | 5,33 bc  | 5,27 c   | 7,22  | <0,01 |
|         | Cen (%)  | 15,41 c                                       | 15,54 bc | 15,63 abc | 15,83 a  | 15,74 ab | 4,22  | <0,05 |
|         | PB* (%)  | 2,94 e  | 3,35 d   | 4,17 c    | 4,77 b   | 6,16 a   | 9842  | <0,01 |
|         | DMS*(%)  | 53,18 c                                       | 53,31 bc | 53,58 ab  | 53,80 a  | 53,85 a  | 5,35  | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En DMS de las secciones de hoja y tallo no se hallaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos con dosis de fertilización mayores a 100 kg N ha<sup>-1</sup>. En forraje este efecto se observó entre los tratamientos de 150 kg N ha<sup>-1</sup> y 300 kg N ha<sup>-1</sup>.

**Tabla 8.9.** Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes dosis de fertilización evaluadas.

| Variable | Dosis de fertilización (kg ha <sup>-1</sup> ) |         |         |         |         | F      | p     |
|----------|---|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
|          | 0   | 50      | 100     | 150     | 300     |        |       |
| FDN (%)  | 55,50 a                                       | 54,30 b | 53,84 b | 53,23 c | 52,75 c | 34,23  | <0,01 |
| FDA (%)  | 35,31 a                                       | 34,86 b | 34,07 c | 33,11 d | 33,02 d | 22,33  | <0,05 |
| LDA (%)  | 5,11 a  | 5,10 a  | 4,97 b  | 4,91 bc | 4,83 c  | 23,28  | <0,01 |
| Cen (%)  | 17,94 d                                       | 18,23 c | 18,48 b | 18,84 a | 18,81 a | 38,72  | <0,05 |
| PB* (%)  | 6,31 e  | 7,04 d  | 8,26 c  | 9,34 b  | 10,53 a | 324,67 | <0,01 |
| DMS*(%)  | 60,78 d                                       | 61,43 c | 62,05 b | 62,79 a | 62,86 a | 22,25  | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

### 8.3.2.3. Densidades de plantas

Al evaluar el efecto de la densidad de plantas a cosecha sobre las variables de calidad analizadas se encontró para las distintas secciones de planta estudiadas (Tabla 8.10) y para forraje (Tabla 8.11) diferencias estadísticamente significativas en FDN, FDA, LDA y Cen asociadas a los tratamientos, con un comportamiento de estas variables tendiente a incrementar conforme se aumentó la densidad de siembra.

En forraje, para las variables estudiadas, no se hallaron diferencias estadísticas entre los tratamientos de igual densidad (S143 y D143). El mismo comportamiento se observó en FDN, FDA, Cen, PB y DMS entre los tratamientos de menor densidad (S72 y D86).

**Tabla 8.10.** Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes densidades de plantas evaluadas.

| Variable | Densidades de plantas (pl ha <sup>-1</sup> ) |         |         |          |          |          |          | F       | p      |       |
|----------|--|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|-------|
|          | S72  | S110    | S143    | D86      | D143     | D286     | D572     |         |        |       |
| Hoja     | FDN*(%)                                      | 43,21 d | 43,70 c | 43,78 c  | 42,95 d  | 43,86 c  | 44,19 b  | 44,40 a | 67,59  | <0,01 |
|          | FDA (%)                                      | 15,15 d | 15,40 c | 15,43 bc | 15,27 cd | 15,41 bc | 15,61 ab | 15,66 a | 6,36   | <0,05 |
|          | LDA*(%)                                      | 3,24 d  | 3,35 c  | 3,42 b   | 3,31 c   | 3,43 b   | 3,53 a   | 3,54 a  | 55,61  | <0,01 |
|          | Cen (%)                                      | 22,14 e | 22,54 d | 23,16 c  | 22,20 e  | 23,31 b  | 23,42 b  | 23,63 a | 131,87 | <0,01 |
|          | PB* (%)                                      | 14,52 a | 14,45 a | 14,32 b  | 14,48 a  | 14,30 b  | 14,19 c  | 13,55 d | 89,32  | <0,01 |
|          | DMS*(%)                                      | 76,68 a | 76,49 b | 76,46 bc | 76,58 ab | 76,48 bc | 76,32 cd | 76,29 d | 6,37   | <0,01 |
| Tallo    | FDN (%)                                      | 62,21 d | 63,06 e | 63,06 c  | 62,23 d  | 63,08 c  | 63,45 b  | 63,55 a | 481,44 | <0,01 |
|          | FDA*(%)                                      | 45,15 f | 45,51 d | 45,64 c  | 45,29 e  | 45,77 b  | 45,20 a  | 45,92 a | 101,66 | <0,01 |
|          | LDA*(%)                                      | 5,13 d  | 5,23 c  | 5,31 b   | 5,27 c   | 5,25 c   | 5,40 a   | 5,37 a  | 45,33  | <0,01 |
|          | Cen*(%)                                      | 15,10 e | 15,17 d | 15,21 c  | 15,13 ab | 15,24 c  | 15,47 b  | 15,64 a | 371,59 | <0,01 |
|          | PB* (%)                                      | 3,31 a  | 3,21 bc | 3,15 de  | 3,23 b   | 3,19 cd  | 3,13 e   | 3,04 f  | 38,94  | <0,01 |
|          | DMS*(%)                                      | 53,48 a | 53,20 c | 53,10 d  | 53,37 b  | 53,00 e  | 52,88 f  | 52,89 f | 106,40 | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En el caso particular de PB se hallaron diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre los distintos tratamientos con un comportamiento común entre las fracciones evaluadas tendiente a disminuir conforme incrementó la densidad de siembra. Para tallo, hoja y forraje no se hallaron diferencias entre los tratamientos S143 y D143, este comportamiento se repitió en hoja y forraje en las densidades S72 y D86.

**Tabla 8.11.** Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes densidades de plantas evaluadas

| Variable | Densidades de plantas (pl ha <sup>-1</sup> ) |         |         |          |         |         |         | F     | p     |
|----------|--|---------|---------|----------|---------|---------|---------|-------|-------|
|          | S72  | S110    | S143    | D86      | D143    | D286    | D572    |       |       |
| FDN (%)  | 56,31 c                                      | 57,39 b | 57,47 b | 56,46 c  | 57,43 b | 57,63 b | 59,02 a | 40,15 | <0,01 |
| FDA (%)  | 35,91 c                                      | 36,69 b | 36,87 b | 36,31 bc | 36,84 b | 36,75 b | 38,76 a | 17,71 | <0,01 |
| LDA*(%)  | 4,55 e                                       | 4,68 d  | 4,76 c  | 4,68 d   | 4,72 cd | 4,83 b  | 4,93 a  | 48,93 | <0,01 |
| Cen (%)  | 17,27 c                                      | 17,33 c | 17,52 b | 17,25 c  | 17,61 b | 17,88 a | 17,53 b | 13,92 | <0,01 |
| PB* (%)  | 6,76 a                                       | 6,50 b  | 6,39 b  | 6,60 ab  | 6,46 b  | 6,47 b  | 5,52 c  | 27,75 | <0,01 |
| DMS*(%)  | 60,62 a                                      | 60,02 b | 58,88 b | 60,32 ab | 59,91 b | 59,97 b | 58,42 c | 15,71 | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca. S72: simple 71.500 pl ha<sup>-1</sup>; D86: doble 85.800 pl ha<sup>-1</sup>; S110: simple 110.000 pl ha<sup>-1</sup>; S143: simple 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D143: doble 143.000 pl ha<sup>-1</sup>; D286: doble 286.000 pl ha<sup>-1</sup>; D572: doble 572.000 pl ha<sup>-1</sup>. \*Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En relación a DMS se observó en hoja, tallo y forraje la reducción de la misma conforme incrementó la densidad de siembra detectándose diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre tratamientos. En hoja y forraje no se detectaron diferencias entre los tratamientos S72 y D86, así como en aquellos de igual densidad (S143 y D143).

### 8.3.3. Frecuencias de riego

A partir de los análisis realizados se observó que en las variables FDN, FDA, LDA y Cen, en ambas secciones de la planta mostraron un patrón tendiente a disminuir sus valores conforme se redujo la frecuencia de riego con diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0,01$ ) entre tratamientos. La PB y DMS incrementaron por efecto del estrés con diferencias entre tratamientos altamente significativas ( $p < 0,01$ ), alcanzándose los mayores valores en el tratamiento de menor frecuencia de riego (FIII). Sin embargo, para hoja no se hallaron diferencias estadísticas en las frecuencias II y III (Tabla 8.12).

**Tabla 8.12.** Calidad nutricional de hoja y tallo de amaranto para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.

| Sección | Variable | Frecuencias de riego |         |         | F       | p     |
|---------|----------|----------------------|---------|---------|---------|-------|
|         |          | I                    | II      | III     |         |       |
| Hoja    | FDN*(%)  | 44,43 a              | 43,87 b | 43,70 c | 708,20  | <0,01 |
|         | FDA*(%)  | 15,41 a              | 15,27 b | 15,18 c | 119,81  | <0,01 |
|         | LDA*(%)  | 4,39 a               | 4,37 a  | 4,33 b  | 8,88    | <0,05 |
|         | Cen*(%)  | 25,23 a              | 23,62 b | 23,41 c | 8592,99 | <0,01 |
|         | PB* (%)  | 14,28 b              | 14,49 a | 14,52 a | 80,95   | <0,01 |
|         | DMS*(%)  | 76,48 c              | 76,58 b | 76,66 a | 127,27  | <0,01 |
| Tallo   | FDN (%)  | 62,19 a              | 62,14 b | 62,07 c | 47,50   | <0,01 |
|         | FDA (%)  | 45,54 a              | 45,30 b | 45,05 c | 151,94  | <0,01 |
|         | LDA*(%)  | 5,39 a               | 5,28 b  | 5,22 c  | 51,84   | <0,01 |
|         | Cen*(%)  | 15,53 a              | 15,46 b | 15,29 c | 160,47  | <0,01 |
|         | PB* (%)  | 3,14 c               | 3,31 b  | 3,46 a  | 160,91  | <0,01 |
|         | DMS*(%)  | 53,18 c              | 53,36 b | 53,55 a | 157,46  | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca \* FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días  $E_{\alpha^2}$  mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

En forraje las variables FDN y FDA mostraron un comportamiento opuesto al antes descrito en la secciones de tallo y hoja, tendieron a incrementar conforme se redujo la frecuencia de riego.

LDA y Cen disminuyeron por efecto del estrés hídrico.

PB y DMS fueron mayores en los tratamientos con alta frecuencia de riego. En PB no se hallaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos FI y FII (Tabla 8.13).

**Tabla 8.13.** Calidad nutricional del forraje de amaranto para las diferentes frecuencias de riego evaluadas.

| Sección | Variable | Frecuencias de riego |         |         | F      | p     |
|---------|----------|----------------------|---------|---------|--------|-------|
|         |          | I                    | II      | III     |        |       |
| Forraje | FDN (%)  | 55,62 b              | 55,75 b | 56,32 a | 21,43  | <0,05 |
|         | FDA (%)  | 34,40 c              | 34,79 b | 35,72 a | 32,69  | <0,01 |
|         | LDA*(%)  | 5,02 a               | 4,96 b  | 4,94 b  | 17,27  | <0,05 |
|         | Cen*(%)  | 19,09 a              | 18,31 b | 17,83 c | 313,35 | <0,01 |
|         | PB (%)   | 7,25 a               | 7,22 a  | 6,92 b  | 14,76  | <0,01 |
|         | DMS (%)  | 61,79 a              | 61,49 b | 60,77 c | 33,35  | <0,01 |

FDN: fibra detergente neutro, FDA: fibra detergente ácida, LDA: lignina detergente ácida, Cen: cenizas, PB: proteína bruta, DMS: digestibilidad de la materia seca \* FI: frecuencia de riego de 7 días, FII: frecuencia de riego de 14 días, FIII: frecuencia de riego de 21 días Eta<sup>2</sup> mayor al 50%. Todos los valores expresados sobre base seca. Valores dentro de una misma variable seguidos de la misma letra, no difieren significativamente según el test de LSD Fisher ( $p \geq 0,05$ ).

## 8.4. Discusión

### 8.4.1. Fechas de siembra

El comportamiento de los parámetros de calidad estudiados respecto de los tratamientos está asociado al desarrollo general de las plantas donde variables tales como altura de planta, número de nudos, máximo de hojas, número de ramificaciones y diámetro de tallo son afectados por condiciones ambientales y de cultivo. Así, los valores de estas variables para las diferentes fechas estudiadas (Capítulo 3) disminuyeron en la 4<sup>o</sup> fecha de siembra por lo que el análisis de calidad reflejó lo que sucedió constitutivamente en la planta. En estos ensayos se observó como en las fechas de siembra 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> y 3<sup>o</sup> las plantas se desarrollaron normalmente mientras que para la 4<sup>o</sup> fecha de siembra el crecimiento y desarrollo se vieron reducido, posiblemente en respuesta a factores tales como radiación, fotoperíodo y temperatura que disminuyen luego de la estación estival. Estas condiciones generaron diferencias

morfofisiológicas entre fechas de siembra que ocasionaron variaciones en: la calidad nutricional de la fibra en su proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina; en el contenido de sustancias inorgánicas (Cen) y de PB de las distintas fracciones estudiadas.

Las plantas de la 1º, 2º y 3º fecha de siembra, que tuvieron ciclos de desarrollo más prolongados y mejores condiciones ambientales, lograron una mayor estructura de planta con aumento de sustancias inorgánicas y síntesis de fibras, debido a la necesidad de sostener una estructura floral de mayor porte. El contenido de PB de las diferentes secciones estudiadas se vio reducido posiblemente por el comportamiento biológico de la célula la cual incrementa la pared celular en detrimento del material citoplasmático con la madurez (Sleugh *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2004).

En el caso de la 4º fecha las condiciones ambientales produjeron el acortamiento de las etapas fenológicas con una inducción floral temprana y al momento de cosecha presentaban hojas y tallos aún verdosos (fotosintéticamente activos) y por lo tanto, con un mayor contenido de proteína y menor desarrollo de componentes estructurales inorgánicos y lignocelulósicos.

En grano los valores de cenizas encontrados en la bibliografía (William y Brenner, 1995; Gimplinger *et al.*, 2007) varían entre 3 y 4%, es decir valores superiores a lo hallado en este trabajo. Estas diferencias podrían estar asociadas al genotipo estudiado o bien a las condiciones ambientales donde se desarrolló el cultivo. En relación con contenido de PB en grano los resultados obtenidos en este ensayo se encuentran dentro del rango de 12-19% citado por la bibliografía (Downton 1973; Betschart *et al.*, 1979; Singhal y Kulkarni, 1988; Bressani, 1989; Lehmann, 1990; Barba de la Rosa *et al.*, 1992). En concordancia con lo observado en esta tesis, Mlakar *et al.*, (2010) hallaron en siembras tempranas mayor acumulación de proteína en grano y mayor concentración de aminoácidos esenciales.

La mayor digestibilidad del grano hallada en las fechas 3 y 4 probablemente se explique por la reducción observada en las fracciones de FDN y FDA, dado que el contenido de LDA no mostró diferencias entre tratamientos.

En relación a la calidad del amaranto como forraje no se encontró descripción de un ensayo de características similares al de esta tesis. Al comparar los valores de los resultados ponderados para estimar la calidad de forraje de esta tesis con la bibliografía disponible en el tema, se encontró que los mismos fueron superiores para las fracciones de fibra y cenizas, e inferiores en PB. No obstante ello, los valores aquí obtenidos concuerdan con lo hallado por otros autores en cuanto a que la calidad del forraje depende del momento de cosecha (Nordheim Viken y Volden, 2009). En efecto los resultados de este estudio fueron, en comparación con la bibliografía, superiores en FDN, inferiores en PB y dentro del rango para las fracciones de FDA y LDA. Esto posiblemente se encuentre asociado al deterioro de la calidad ocasionado por el avance de la madurez del cultivo al momento de la toma de muestras. Así Stordahl *et al.* (1999), reportaron que la pérdida de calidad a la madurez se asocia con el incremento de la concentración de FDN y FDA en el tallo, y Písaříková *et al.*, (2006) y Abbasi *et al.*, (2012), asignaron la reducción de la calidad nutricional a la disminución del contenido de proteína y al incremento de la fracción fibra que ocurrió a lo largo del período del crecimiento del amaranto.

En concordancia con lo antes mencionado, otros autores hallaron que el contenido de FDN, FDA y LDA incrementa con el avance de la madurez, mientras que PB disminuye debido a la reducción de la relación hoja-tallo. El mayor aporte de proteína del forraje se asocia con las hojas, cuyo número se reduce con el avance de la madurez (Freer y Dove, 2002; Sleugh *et al.*, 2001; Yu *et al.*, 2004). En relación con el elevado contenido de cenizas del amaranto Edwards *et al.* (1983), lo atribuyen al metabolismo C4 y a la elevada tasa de captación de carbono por unidad de área que esta planta presenta.

Los resultados de este estudio se encuentran dentro del rango de valores de PB y FDN citados en la bibliografía para tallo aunque, la FDN de hoja resultó superior (Riveros y Cristi, 1988; Sleugh *et al.*, 2001; Písaříková *et al.*, 2007; Pospisil *et al.*, 2009; García-Pereyra *et al.*, 2009). Para amaranto cultivado en Argentina los valores registrados de cenizas fueron entre 20-25% para hojas y 19-20% para tallo, mientras que para forraje los valores rondan entre 17-21% (Troiani *et al.*, 1989; Troiani *et al.*, 1998). Estos valores concuerdan con lo hallado en este trabajo en hojas y forraje aunque resultan superiores en tallo.

En relación con DMS el incremento de la misma observado en tallo y hoja al retrasar la fecha de siembra podría estar asociado a los menores valores de los constituyentes de la fibra obtenidos y al mayor contenido de PB. Estos resultados concuerdan con numerosos autores en el sentido que el incremento de fibra en el forraje disminuye su digestibilidad (Kenneth y Jung, 2001; Rodríguez-Romero *et al.*, 2002; Muhammad Ayub *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2004; Písaříková *et al.*, 2006; Ibrahim *et al.*, 2012). Entre los días 80 y 120 del ciclo del amaranto el valor nutricional disminuye debido al incremento de la fibra insoluble, especialmente LDA, y a la reducción del contenido de PB (Sleugh *et al.*, 2001; Písaříková *et al.*, 2007; Pospisil *et al.*, 2009). En este ensayo, si bien en las fechas más tardías el cultivo completa su ciclo no logra incrementar en demasía el contenido de fibras y mantiene aceptables contenidos de PB, por lo tanto expresa mayores valores de digestibilidad.

En relación a los valores aquí obtenidos al evaluar la calidad del forraje en función de la fecha de siembra, es importante destacar que no se apreciaron entre tratamientos diferencias agronómicamente relevantes.

#### 8.4.2. Fertilización nitrogenada

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se evidenció el efecto generado por la fertilización en ciertos parámetros calidad estudiados tales como: la reducción de los constituyentes de la fibra en hoja y tallo, aunque sin efecto en el grano; y del incremento del contenido de Cen y PB de las diferentes secciones de la planta estudiadas.

La disponibilidad de N por medio de la fertilización favoreció la incorporación de este nutriente a las estructuras de la planta y el desarrollo general de la misma, situación que se visualizó como un incremento de la biomasa total de la planta y en una mayor durabilidad del área foliar (Capítulo 5). Este hecho permitió a la planta mantener la superficie fotosintética por un período mayor de tiempo y por ende aumentar la disponibilidad de nutrientes para la síntesis de nuevos componentes nitrogenados entre otros, lo cual podría explicar el incremento del contenido de Cen y PB observado en este ensayo. Patel *et al.*, (1994) atribuyeron el incremento de proteína en forraje de sorgo por efecto de la fertilización nitrogenada a la mejora ocasionada en la síntesis de aminoácidos.

Tal como se halló en el ensayo de fechas de siembra, conforme avanzó el estadio de madurez de la planta se incrementó el contenido de pared celular. La fertilización nitrogenada retrasó la senescencia del cultivo, hecho que podría explicar los menores valores de fibra obtenidos con el aumento de la dosis de fertilizante aplicada.

En relación a lo antes mencionado y a lo observado en esta tesis, un ensayo realizado en diferentes variedades de amaranto con distintas dosis de fertilización mostró incrementos en el contenido de proteína de grano, hoja y tallo, y aumentos del contenido de cenizas debido a la fertilización, mientras que la misma no tuvo efectos en la fibra (Olaniyi *et al.*, 2008). Estos resultados coinciden con el comportamiento manifestado en esta tesis, con valores similares de PB en grano aunque resultaron superiores en tallo y hoja. Sin embargo, en el caso de la fracción

fibra de tallo y hoja de este trabajo se detectó una reducción de la misma con diferencias estadísticas altamente significativas asociadas a la dosis de fertilización, a pesar de ello las mismas serían de poca relevancia agronómica.

Es importante destacar el efecto de la fertilización en el contenido de proteína de las distintas fracciones estudiadas donde se observó un incremento respecto del control de 3,5 % y 3,1% para tallo y hoja respectivamente con dosis de 150 kg N ha<sup>-1</sup>. En el tallo el incremento fue de 3,2 % aun con dosis de 300 kg N ha<sup>-1</sup>. Si bien la tendencia observada es el incremento de PB con el aumento de fertilizante, sería conveniente considerar si el efecto generado en el rendimiento económico y biológico es económicamente viable para el productor.

Diversos trabajos de investigación en este cultivo mostraron aumentos mayores al 5 % en la proteína bruta del grano por efecto de la fertilización nitrogenada (Breessani *et al.*, 1987; Elbehri *et al.*, 1993; Mlakar *et al.*, 2010). Otros autores, en contraposición a lo hallado en este ensayo, no evidenciaron influencia de la fertilización en los valores de PB, fibra, grasas, almidón y azúcares totales en grano posiblemente debido a que el suelo se encontraba adecuadamente provisto de N (Pospisil y Pospisil *et al.*, 2008).

En el caso particular del grano este ensayo de fertilización no generó efectos en los constituyentes de la fibra y por lo tanto no se observaron cambios en la digestibilidad del mismo. Sin embargo, mejoras en la digestibilidad por efecto de la fertilización nitrogenada han sido halladas por diferentes autores en amaranto y otros cultivos (Kering *et al.*, 2011; Mahmut y Comakli., 2011; Abbasi *et al.*, 2012; Ardali y AghaAlikhani, 2015). Por su parte Pospisil y Pospisil., (2008) no hallaron efectos significativos de la fertilización nitrogenada en la concentración de proteína bruta, grasa, fibra, almidón y azúcares totales en semillas de dos especies de amaranto.

En relación con la calidad de forraje *A. hypochondriacus* fertilizado con diferentes dosis de N, en estado de grano lechoso, mostró incrementos en PB y Cen mientras no se observaron cambios en FDN, FDA y LDA (Abbasi *et al.*, 2012). En los ensayos de esta tesis PB y Cen tendieron a incrementar del 18 al 19 % y de 6,3 al 11 %, respectivamente, por efecto de la fertilización, comportamiento que se ajusta al descrito anteriormente por Abbasi *et al.*, (2012) aunque las mismas resultan superiores en ceniza e inferiores en PB. En relación con contenido de fibra el comportamiento de los valores de las distintas fracciones (FDN, FDA y LDA) difieren a los resultados obtenidos por Abbasi *et al.*, (2012) dado que estos valores se redujeron con el incremento de la dosis de fertilización, y a su vez, resultaron superiores posiblemente debido al manejo del cultivo y al deterioro de la calidad ocasionado por el avance de la madurez al momento de la toma de muestras. En concordancia con los resultados hallados en este trabajo, Walters *et al.*, (1988) encontraron que el incremento de fertilización nitrogenada redujo linealmente el contenido de FDN de diferentes secciones de la planta de amaranto. Este manejo favorecería el aumento de la calidad del forraje, sin embargo en caso de exceso puede incrementar la FDN del tallo o generar toxicidad.

Otros autores hallaron en amaranto y otros cultivos un comportamiento similar al de este ensayo, donde el contenido de proteína incrementó, la fibra se redujo y la digestibilidad de la materia seca aumentó debido al efecto de la fertilización (Mc Donald *et al.*, 1991; Johnson *et al.*, 2001; Muhammad *et al.*, 2002; Almodares *et al.*, 2009; Makinde *et al.*, 2010; Kering *et al.*, 2011, Sarmadi *et al.*, (2016). Sin embargo, en otro trabajo donde se evaluó la incidencia de la fertilización en forraje de *A. mantegazzianus* en la zona semiárida pampeana argentina, no obtuvo diferencias en el contenido de nutrientes (PB, Cen, calcio, magnesio y fósforo) así como en la producción de biomasa (Troiani *et al.*, 2005).

En relación con la digestibilidad es evidente la mejora de la misma en tallos y hojas conforme se incrementó la dosis de fertilización, esta respuesta probablemente se encuentre

asociada a la reducción de la fracción fibra por efecto de los tratamientos. Es importante destacar que la mayoría de las variables de calidad evaluadas no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos de 150 y 300 kg N ha<sup>-1</sup>.

#### **8.4.3. Densidad de plantas**

A partir de los resultados obtenidos se aprecia como el aumento de densidad de plantas a cosecha, permite incrementar los rendimientos económicos y biológicos (Capítulo 6). Sin embargo, en lo que respecta a calidad se observó un comportamiento opuesto, hecho que podría estar asociado al incremento de competencia intraespecífica que se manifestó como una reducción de la biomasa aérea por planta y por lo tanto en una menor superficie fotosintética. Esta situación incrementaría la relación tallo/hoja y por lo tanto el contenido de fibra. Yarnia *et al.*, (2010), menciona que el incremento de densidad en amaranto redujo la biomasa de planta y sus componentes (número de hojas, ramificaciones, altura de planta) y por lo tanto disminuyó la asimilación neta hecho que incide en la calidad nutricional de la planta y en el rendimiento en grano. Mahmoud *et al.*, (2013) y Moshaver *et al.*, (2015), atribuyen la reducción de la calidad de la biomasa del sorgo, maíz y amaranto, sembrados en altas densidades, al efecto del sombreado y a la competencia por luz y nutrientes minerales entre plantas lo cual disminuiría la síntesis de fotoasimilados y la estructura morfológica de las plantas.

Para el caso del N, por efecto del aumento del sombreado entre plantas vecinas se reduce la concentración de nitrato reductasa, situación que se aprecia en una disminución del N en el grano (Graybill *et al.*, 1991), o reducción del contenido de PB en grano de maíz y en grano y tallo de amaranto (Myers, 1996; Sadeghi y Bohrani, 2000; Yarnia *et al.*, 2010). Estos resultados concuerdan con lo hallado en esta tesis y podrían explicar el comportamiento de la fracción PB observado.

Troiani y Ferramola (2005) se refieren a que una adecuada densidad de plantas para la elaboración de cubos compactados de amaranto de óptima calidad, es aquella que permite un desarrollo de plantas con tallos de inferior diámetro y mayor proporción de hojas, las que por su mayor calidad nutritiva respecto del tallo aseguran una mejor calidad de forraje (Troiani *et al.*, 1989).

La reducción de la calidad de forraje observada en este ensayo conforme se aumentó la densidad de siembra podría asociarse al incremento de los valores de fibra y a la reducción del contenido de PB, hecho que explicaría los menores valores de DMS obtenidos. En concordancia con ello, incrementos en la densidad de siembra ocasionaron el aumento del contenido de fibra en forrajes de sorgo, maíz y amaranto con la correspondiente reducción en digestibilidad (Moshaver *et al.*, 2015). Un trabajo realizado en maíz mostró como resultado del incremento de densidad de plantas un aumento en el contenido de materia seca, FDN, FDA y una reducción en el contenido de PB y DMS (Cusicanqui y Laur, 1999).

En este trabajo la digestibilidad estimada tendió a disminuir conforme se incrementó la densidad de plantas, respuesta que podría estar asociada con el aumento de las fracciones de fibra analizadas (FDN, FDA, y LDA) y con la reducción de PB. Este hecho podría deberse al aumento de la proporción de tallo en la relación tallo/hoja, el cual presenta mayor contenido de fibra y menor porcentaje de proteínas. En relación a lo antes mencionado numerosos autores atribuyen la disminución de la digestibilidad al incremento de la fracción fibra (Rodríguez-Romero *et al.*, 2002; Muhammad Ayub *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2003; Yu *et al.*, 2004; Písaříková *et al.*, 2007; Ibrahim *et al.*, 2012). En el caso particular del amaranto, entre los días 80 y 120 del ciclo, el valor nutricional del mismo disminuye debido al incremento de la fibra insoluble, especialmente LDA, y a la reducción del contenido de PB (Sleugh *et al.*, 2001; Písaříková *et al.*, 2007; Pospisil *et al.*, 2009).

Es importante destacar que si bien se detectaron diferencias estadísticas significativas en las variables de calidad estudiadas respecto de las densidades de planta evaluadas, la magnitud de las mismas sería de poca relevancia agronómica entre los tratamientos. Por lo tanto, sería importante considerar como densidad óptima aquella que permitiría alcanzar altos rendimientos en grano y/o biomasa con una adecuada eficiencia de los recursos ambientales.

#### **8.4.4. Frecuencias de riego**

Los resultados de laboratorio asociados con la calidad nutricional del cultivo evidenciaron que: por un lado el estrés hídrico redujo los componentes estructurales de la fracción fibra; y por otro incrementó del contenido de proteína de tallos, hojas y granos. Estos hechos podrían asociarse con una respuesta morfofisiológica de la planta, la cual disminuye sus carbohidratos estructurales e incrementa los carbohidratos solubles para mantener un ajuste osmótico que permita su supervivencia. Esta es una estrategia que le permite a la planta de amaranto continuar sus funciones aún en condiciones de sequía severas (Liu y Stützel, 2002a); y Omami y Hammers, 2010). Bajo condiciones de estrés se reduce el porte general de la planta, su biomasa y la elongación de tallos y hojas. Esta respuesta podría relacionarse con incremento del cierre estomático, situación que disminuye la tasa fotosintética (Taiz y Zeiger, 2006) y ocasiona disturbios en el normal funcionamiento del metabolismo de aminoácidos y carbohidratos, por ejemplo que los carbohidratos y metabolitos proteicos se acumulen en hojas (Pelleschi *et al.*, 1997). Este comportamiento podría explicar el incremento de PB y los menores valores de fibras hallados en este ensayo. En este sentido Islam *et al.*, (2011) mencionan que en plantas de maíz irrigadas adecuadamente se reduce el contenido de proteína y los carbohidratos solubles dado que la disponibilidad de agua permite la transferencia de nutrientes con aumento de los rendimientos de tallos y hojas y, por lo tanto, de la fracción fibra.

Este efecto es más visible en las células del tallo donde la pared celular es mayor (Philipp *et al.*, 2005) y como consecuencia se reduce el contenido del protoplasma.

En relación al efecto generado por la aplicación de prácticas de riego en la calidad nutricional del cultivo de amaranto no se halló bibliografía específica, por este motivo se tuvieron en cuenta las diferentes respuestas de otros cultivos para asociarlas al comportamiento observado en este ensayo.

En lo que respecta a la calidad del forraje se observó como el aumento de la frecuencia de riego redujo el contenido de FDN y FDA, mientras que LDA, Cen y PB incrementaron. La reducción de la fracción fibra y el incremento de PB explicarían el aumento de DMS observado en este tratamiento. En contraposición con lo hallado, trabajos realizados en sorgo forrajero mostraron que el incremento de riego aumentó la FDN y redujo la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (Carmi *et al.*, 2006).

Los menores valores de PB y DMS hallados en el tratamiento FIII podrían explicarse por un menor aporte de las hojas en la relación tallo/hoja, y a los menores valores de PB que el tallo presenta. El mayor aporte de proteína del forraje se asocia con las hojas, cuyo número se reduce con el avance de la madurez (Sleugh *et al.*, 2001; Freer y Dove, 2002; Yu *et al.*, 2004).

En este ensayo la madurez del cultivo incrementó el contenido de fibras en detrimento del contenido de PB, a pesar de ello, LDA en tallo y hoja fue menor, hecho que favoreció la digestibilidad a pesar de los bajos valores de PB. Otros autores han hallado resultados similares, en los cuales destacan que el déficit hídrico reduce la lignificación, efecto asociado con los cambios ocasionados en el desarrollo y morfología de las plantas (Buxton y Casler 1993; Akin *et al.*, 1994; Amaducci *et al.*, 2000; Kenneth *et al.*, 2001; Carmi *et al.*, 2006; Jahanzad *et al.*, 2013)

En relación con la calidad el grano, PB tendió a incrementar conforme se redujo la frecuencia de riego, aunque no hubo diferencias entre los tratamientos II y III. Lavini *et al.*, (2016), en concordancia con lo observado en los resultados de esta tesis, encontró que la composición química de semillas de amaranto se veía afectada por los tratamientos de riego, donde el almidón y las cenizas disminuían, mientras que la proteína incrementaba, por efecto del estrés hídrico.

En el ensayo FI se observaron los mayores valores de FDN, FDA, LDA y Cen, esto puede deberse a una mayor translocación de nutrientes minerales de las raíces a los granos, promovida por la mayor disponibilidad de agua tal como propone Vieira Queiroz, *et al.*, (2015). A nivel celular, el aumento de la fracción fibra se asocia al incremento de las paredes celulares, con lo cual se reduce el contenido citoplasmático y consecuentemente disminuye DMS. Otros autores detallan un comportamiento de la fracción proteica similar al hallado en este trabajo en diferentes cultivos tales como: trigo (Guttieri *et al.*, 2000; Ozturk y Aydin, 2004; Singh *et al.*, 2012) maíz (Esmailian *et al.*, 2011, Aydinsakir *et al.*, 2013; Ertek y Kara, 2013; Farhad *et al.*, 2013; Karasu *et al.*, 2015), sorgo (Eppendorfer *et al.*, 1985).

Es importante destacar que si bien en lo que respecta a las variables de calidad del cultivo se hallaron diferencias estadísticas entre los tratamientos evaluados, la magnitud de las mismas podría considerarse poco relevantes agrónomicamente. No obstante ello, su importancia radica en el manejo más eficiente del recurso hídrico de la zona de estudio, e incluso en la posibilidad de siembra del cultivo en condiciones de secano. Trabajos realizados en este cultivo destacan la tolerancia del mismo a la sequía y su adaptabilidad a zonas marginales, principalmente debido a su eficiente uso del agua (Liu y Stützel, 2004; Schahbazain *et al.*, 2006; Ferrarotto 2010; Mlakar *et al.*, 2012).

En el Capítulo 6 se observó que los mayores rendimientos en grano se obtuvieron con la FII, mientras que el mayor rendimiento biológico se logró en FI. A pesar de ello, si lo deseado es

un manejo sustentable de los recursos suelo y agua y un óptimo balance entre producción y calidad, la frecuencia II sería la considerada como adecuada. En el caso de destinar este recurso para la producción de otros cultivos, es importante destacar la capacidad del amaranto de tolerar la restricción de agua (frecuencia cada 21 días) y, a pesar de la merma en los rendimientos económicos y biológicos, preserva la calidad nutricional del grano con elevados valores PB y DMS.

### **8.5. Conclusiones**

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que las prácticas de manejo empleadas durante el desarrollo del cultivo generan efectos en la calidad nutricional.

En lo que respecta a la fecha de siembra podemos mencionar que fechas tardías permiten obtener mejores valores de calidad nutricional ya sea en grano como en forraje. A pesar ello, las diferencias halladas son de poca relevancia agronómica por lo que sería conveniente considerar siembras entre fines de noviembre y principios de diciembre como óptimas para las condiciones de ensayo dado que proveen altos rendimientos económicos y biológicos de adecuada calidad nutricional.

La fertilización como práctica de manejo en el cultivo de amaranto permite mejorar el contenido de PB de grano y forraje. Este efecto se logra con dosis de hasta  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ , por sobre esta dosis no se observan efectos en la calidad del mismo.

Con respecto a la densidad de plantas se observó como el aumento de la misma influencia negativamente en la calidad del forraje. Por lo tanto, sería importante considerar como densidad óptima aquella que permitiría alcanzar altos rendimientos en grano y/o biomasa con una adecuada eficiencia de los recursos ambientales y buena calidad nutricional del cultivo. En las condiciones de este estudio se considerarse óptima  $143.000 \text{ pt ha}^{-1}$  sembradas a una cara del surco (0,70 cm).

En relación a la práctica de riego, frecuencias intermedias (cada 14 días) permiten una adecuada EUA con valores óptimos de rendimiento biológico, económico y calidad nutricional de grano y forraje.

Los resultados obtenidos en estos ensayos ponen de manifiesto que, a pesar de que el cultivo de amaranto en la región de estudio se centre en la producción de grano, los residuos de cosecha serían una alternativa nutricional para la producción animal como forraje de baja calidad.

## 9. CONCLUSIONES FINALES

---

El cultivo de amaranto puede considerarse una alternativa productiva para el Valle Inferior del Río Negro debido a su adaptabilidad a las condiciones edafoclimáticas del sitio y a los destacados rendimientos económicos y biológicos de calidad nutricional.

A. *Cruentus* cv Mexicano es el material genético que presentó las mejores características morfológicas y productivas para la región del Valle Inferir del Río Negro.

La fecha de siembra óptima para la zona es principios del mes de diciembre dado que las condiciones de temperatura, radiación y fotoperiodo permiten cumplir adecuadamente el ciclo fenológico del cultivo con los mayores valores de rendimiento económico y biológico.

El periodo de crecimiento vegetativo del amaranto se acorta bajo condiciones de reducción de longitud del día y temperatura media del aire, tal como ocurre hacia finales del periodo estival.

El cultivo de amaranto responde a la fertilización nitrogenada con: crecientes rendimientos económicos y biológicos; disminución de la incidencia de enfermedades; mayor supervivencia de plantas por hectárea; y mayor longitud del ciclo productivo. Esto último debe considerarse, dado que, puede dificultar el momento de cosecha al coincidir con el inicio de la temporada de precipitaciones de la zona. La dosis de 300 kg N ha<sup>-1</sup> permite alcanzar los valores más altos de rendimiento económico y biológico.

La densidad de plantas óptima para la zona de estudio es de 143.000 pl ha<sup>-1</sup> sembradas a 0,70 m, dado que no incide de manera relevante sobre la estructura morfológica de las plantas

lo cual reduce las condiciones de estrés intraespecífico y permite alcanzar altos rendimientos económicos y biológicos. Este espaciamiento entre surcos favorece las labores de control de malezas, fertilización, aporque y reduce la incidencia de enfermedades.

El amaranto tolera el estrés hídrico sin embargo, es importante evitar la falta de agua durante los primeros estadios de desarrollo del cultivo y valores próximos a PMP en el suelo durante el estadio fenológico de anthesis, dado que, en estos casos la pérdida de rendimiento se incrementa. Bajo las consideraciones antes descritas, una frecuencia de riego cada 14 días es la más recomendable para la zona debido a que logra altos rendimientos y una óptima EUA.

Las prácticas de manejo empleadas durante el desarrollo del cultivo generan efectos en la calidad nutricional del mismo, siembras realizadas durante la temporada de verano permiten mejores valores de calidad nutricional en grano y forraje. A pesar de ello, las diferencias entre fechas son de poca relevancia agronómica por lo que es conveniente la siembra de principios de diciembre dado que permite altos rendimientos conservando la calidad nutricional.

La fertilización mejora el contenido de PB en grano y forraje, este efecto se logra con dosis de hasta  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ , por sobre esta dosis no se observan mejoras en la calidad.

Altas densidades de siembra influyen negativamente sobre la PB del grano y del forraje por lo tanto, la densidad recomendada de  $143.000 \text{ pt ha}^{-1}$  a 0,70 es apropiada para obtener altos rendimientos de calidad nutricional.

Una frecuencia de riego cada 14 días permite una alta EUA con valores óptimos de rendimiento y contenido de PB en grano y forraje.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

---

- Abbasi D, Rouzbehan Y, Rezaei J. 2012. Effect of harvest date y nitrogen fertilization rate on the nutritive value of amaranth forage (*Amaranthus hypochondriacus*). Anim Feed Sci Technol 171:6–13.
- Adeniran, K.A. 2004. The Effects of Moisture Stress on Growth y Yield of Maize (*Zea Mays* L). Journal of Applied Science y Technology. 4 (1):1 – 6.
- Agamennoni, R. 1995. Informe anual del plan de trabajo: Tecnología de la producción de cultivos semi intensivos alternativos. EEA INTA Hilario Ascasubi.
- Aguilar, J. y G. Alatorre. 1978. Monografía de la planta de alegría. Grupo de Estudios Ambientales, A. C. , Mexico. 1 (1) 157-203.
- Aguilar V.A. y Colaboradores. 1997. Tratado para Administrar los Agronegocios Editorial UTEHA 5ª Edición. México
- Ainika, J. N.; Auwalu, B. M, Yusuf, A. U. 2011. Response of Grain Amaranth (*Amaranthus cruentus* L) to Nitrogen y Farmyard Manure Rates in Northern Guinea y Sudan Savanna Ecological Zones of Nigeria World J of Engineering y Pure y Applied Sci.1(2):46 ISSN 2249-0582.
- Akin, D.E., Kimball, B.A., Mauney, J.R., La Morte, R.L., Hendrey, G.R., Lewin, K., Nagy, J., Gates, R.N., 1994. Influence of enhanced CO<sub>2</sub> concentration y irrigation on Sudan grass digestibility. Agric. For. Meteorol. 70, 279–287.
- Alder M. 2010. *Etapas de la Extensión rural en el Valle Inferior del Río Negro*. Información Técnica N° 28. Año 5, N° 10. EEA Valle Inferior del Río Negro (convenio Provincia de Río Negro – INTA), Viedma.
- Alejoyre Iturbide, G. y Gómez Lorence, F. 1986. Cultivo del amaranto en México. Colección Cuadernos Universitarios. Serie Agronomía No. 12. Universidad Autónoma Chapingo. 245 p.
- Alfaro, M.A.; Martínez, A. Ramírez, R.; Bressani, R. 1987. Yield y chemical composition of the vegetal parts of the amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*, L.) at different physiological stages. Arch Latinoam Nutr. 37: 108-121.
- Allen, R.G.; Pereira; L.S., Raes D. y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation y Drainage Paper N°56, FAO, Rome, Italy.

- Almodares, A., Jafarinia, M., Hadi, M.R., 2009. The effects of nitrogen fertilizer on chemical compositions in corn y sweet sorghum. *American- Eurasian. J. Anim. Sci.* 79, 2449-2455.
- Alonge, S. O., Alonge, F. O., Bako, S. P., Olarewaju, J. D. y Adeniji, O. B., 2007. Effects of Rates y Split Application of Compound NPK Fertilizer on the Growth y Yield of Three *Amaranthus* Species in Nigeria Guinea Savanna. *Asian Journal of Plant Sciences*, 6: 906-912.
- Alonso, M. A. y Rebay, R. A. 1995. Estadísticas agroclimáticas 1965-1989. *Inf. Téc. N°3, EEA Valle Inferior del Río Negro Convenio IDEVI-INTA*, p. 41-42.
- Amaducci, S., Amaducci, M.T., Enati, R., Venture, G., 2000. Crop yield y quality parameters of four annual fiber crops (Hemp, Kenaf, Maize, y Sorghum) in the north of Italy. *Industrial Crops y Products* 11, 179–186.
- Anonymous. 1991. Annual Progress Report 1991-1992. All India Coordinated Research Project on Under Utilized y Under Exploited Plants. NBPGR. Pusa campus. New Delhi. p. 1-44.
- A.O.A.C. 1990. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C. (15th edition).
- Apaza Gutierrez, V., Romero Saravia, A., Guillen Portal, F.R., Baltensperger, D. D. 2002. Response of grain amaranth production to density y fertilisation in Tarija, Bolivia. In: Janick J., Whipkey A. (eds.): *Trends in New Crops y New Uses*. ASHS Press, Alexyria: 107–109.
- Ardali, S. A.; AghaAlikhani, M. 2015. Effect of plant density y nitrogen fertilizer rate on forage yield y quality of cultivated amaranth (*Amaranthus cruentus* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences* Vol. 17 No. 1 p.35-45. ISSN1562-5540.
- Arellano Vázquez, J L 2000. El amaranto, un cultivo alternativo de alta calidad nutritiva. In: *Memoria Técnica No. 1. SAGARPA INIFAP-CIR CENTRO*. Chapingo, México. p:51-59.
- Arellano Vázquez, J. L.; Galicia Franco, J. A. 2007. Yield y plant y panicle traits in amaranth in response to nitrogen y seeding rate. *Agricultura Técnica en México*. 33(3): 251-258.
- Arriaga, H.O.; Chidichimo, M.E.; Cattaneo, D.M.; Orsini Margiotta, N.M., Iglesias F.A.; Bardelois E.; Salguero J. y Figueroa M.. 1984. III Congreso Nacional de Maíz, Pergamino p. 134-145.

- Aydinsakir, K., Erdal, S., Buyuktas, D., Bastug, R., Toker, R. 2013. The influence of regular deficit irrigation applications on water use, yield, y quality components of two corn (*Zea mays* L.) genotypes. *Agricultural Water Management* 128:65-71.
- Ayodele, V.I. 2000. Influence of soil water stress at different physiological stages on growth y seed yield of amaranthus species. *Acta Hortic.* 537, 767-772.
- Bakht, J., Shafi, M., Yousaf, M., Shah, H.U. 2010. Physiology, phenology y yield of sunflower (autumn) as affected by NPK fertilizer y hybrids. *Pak. J. Bot*, 42: 1909-1922.
- Bale, J. R. y Kauffman, C.S. 1992. Special issue on grain amaranth: New potential for an old crop. *Food Rev. Int.* 8:1-190.
- Bancal, P. 2008. Positive contribution of stem growth to grain number per spike in wheat. *Field Crop Res.* 105:27-39.
- Byiougou Diawara. 2012. Effect of planting date on growth, development, y yield of grain sorghum hybrids. Thesis for the degree master of science. Department of Agronomy College of Agriculture Kansas State University Manhattan, Kansas.
- Bansal, G.L, Rana, M.C, Upadhyay, G. 1995 Response of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) to plant density. *Indian J. Agric. Sci.* 65:818-820.
- Barba de la Rosa, A. P, Gueguen, J. Paredes López, O., Viroben, G. 1992. Fractionation procedures electrophoretic characterization, an amino acid composition of amaranth seed proteins. *J. Agric. Food Chem.* 40,931-936.
- Barba De La Rosa, A.P.; Silva-Sánchez, C.; González De Mejia, E. 2007. Amaranth: An Ancient Crop For Modern Technology. In: *Hispanic Foods: Chemistry Y Flavor*. Tunick M.H. González De Mejia E. Eds. Publisher: American Chemical Society Washington DC p 103-116.
- Barnard, C. S. y Nix, J. S. 1984. *Planeamiento y control agropecuarios*. 2a. ed. Buenos Aires: El Ateneo. ISBN: 950-02-3022-4. p527
- Barros, C. y Buenrostro, M.. 1997. *Amaranto. Fuente maravillosa de sabor y salud*. Grijalbo. p.158.
- Barros, J. F. C., Carvalho, M. y Basch, G., 2004. Response of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to sowing date y plant density zunder Mediterranean conditions. *Europ. Journal Agronomy.*, 21: 347–356.

- Bazzaz, F. A. y Ackerly, D. D. 1992. Reproductive allocation y reproductive effort in plants. Seeds: the ecology of regeneration in plant communities. Ed. Fenner CAB International, Wallingford Oxon. UK. p 1–26
- Becerra, R. 2000. El amaranto: nuevas tecnologías para un antiguo cultivo. CONABIO. Biodiversitas 30: 1-6.
- Becker, R., Wheeler, E. L., Lorenz, K., Stafford, A. E., Grosjean, O. K., Betschart, A. A y. Syers, R. M. 1981. A compositional study of amaranth grain. J. Food Sci. 46(4): 1175 – 1180.
- Bejosano, F. P. y Corke, H. 1998. Protein quality evaluation of *Amaranthus* wholemeal flours y protein concentrates. J. Sci. Food Agric., 76 (1) 100–106.
- Bekele, S., Tilahun, K., 2007. Regulated deficit irrigation scheduling of onion in a semiarid region of Ethiopia. Agric Water Manage 89, 148-152.
- Berasategui, L. 2002. Estadísticas climáticas del Valle de Viedma. 30 años: Información Técnica N° 20. Año 1 N°2 – ISSN: 1666-6054. p: 1-70.
- Berger, A., Monnard, I., Dionisi, F., Gumy, D., Hayes, K.C., Lambelet, P. 2003. Cholesterol lowering properties of amaranth flakes, crude y refined oils in hamsters. Food Chemistry 81:119–124.
- Bertoni, M.H.; Cattaneo, P. 1987. Aspectos nutricionales del follaje y de la semilla de Amarantos Americanos Cultivados, en: Actas de las Primeras Jornadas Nacionales sobre Amarantos. Universidad Nacional de La Pampa. Fac. de Agr. Santa Rosa. La Pampa, Argentina, p. 63-86.
- Betschart, A. A., Irving, D. W., Shepherd, A. D. Wheeler E. L. y Saunders R. M. 1979. Nutritional studies on *Amaranthus hypochondriacus* y its milling fractions. Proceedings of the Second Amaranth Conference. Rodale Press Inc., Emaus, PA. p. 59-65.
- Betschart, A. A.; Irving, D. W.; Shepherd, A. D. y Saunders, R. M. 1981. *Amaranthus cruentus*: milling characteristics, distribution of nutrients within seed components, y the effects of temperature on nutritional quality. J. of Food Science, 46: 1181-1187.
- Bonilla, C.; Cancino, J. 2001. Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia . Agricultura Técnica (Chile). 61 (3): 326-338
- Boote, K. J.; Bennet, J.M.; Sinclair, T. R.; Paulsen, G. M. 1994. Physiology y determination of crop yield. American Society of Agronomy. University of Minnesota. ISBN: 0891181229, 9780891181224. p 601.

- Boss, P.K., Bastow, R.M., Mylne, J.S. y Dean, C. 2004. Multiple pathways in the decision to flower: enabling, promoting, y resetting. *Plant Cell*, 16, 18–31.
- Bryán, A. E. Z., González, A. G., Seco, E. C.; Alemán, P.; Tapia, A. M.; Romero, A. A.; Murúa, F.; Ribera, D.; Nieva, E. 2013. Comportamiento del amaranto en diferentes fechas de siembra en Tafí Del valle, Tucumán, Argentina. *Biología en agronomía*. Volumen 3, No. 2 ISSN 1853-5216.
- Brenner, D y Hauptli. 1990. Seeds hattering control within dehiscent utricles in grain amaranths. *Legacy* 3 (1): 2-3.
- Breener, W. M. 1991. Food uses of grain amaranth. *Cereal Foods World* 36: 426-430.
- Brenner, D. M., Widrlechner, M. P. 1998. Amaranthus seed regeneration in plastic tents in green houses. *Plant Genet Resour Newsl* 116:1–4.
- Brenner, D. M., Baltensperger, D. D., Kulakow, P. A., Lehmann, J. W., Myers, R. L., Slabbert, M. M., Sleugh, B. B., 2000. Genetic resources y breeding of amaranthus, *Plant Breeding Reviews* 19: 229-238.
- Bressani, R. 1989. The Proteins of Grain Amaranth. *Food Reviews International*, 5(1), p. 13-38.
- Bressani, R., Gonzáles, J. M, Zuniga, J. Brauner M. y Elias, L.G. 1987. Yield, selected chemical composition y nutritive value of 14 selections of amaranth grain representing four species. *J. Sci. Food Agric.*, 38: 347-356.
- Brommer, J. M. y Morgenstern, G. 1992. Backeig enschaften der Pseudo-Cerealien Amaranth und Quinoa. *Getreide, Mehl u. Bot.* 46 (3): 78-84.
- Burdon, J.J., y Chilvers, G.A. 1982. Host density as a factor in plant diseased ecology. *Annu. Rev. Phytopathol.* 20:143-166.
- Buxton, D.R. y M.D. Casler. 1993. Environmental y genetic effects on cell wall composition y digestibility. In: H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield, y J. Ralph (ed.) *Forage cell wall structure y digestibility*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisc. p. 685–714
- Campos, H. A. 2010. Producción de humus de lombrices a base de cachaza; SAGARPA, INIFAP, CIRPAS, Campo Experimental Zacatapec, Fundación Produce Morelos, A. C., Folleto para productores. (Inédito).
- Carmi, A, Aharoni, Y., Edelstein, M., Umiel, N., Hagiladi, A., Yosef, E., Nikbachat, M., Zenou, A. y Miron, J. 2006. Effects of irrigation y plant density on yield, composition y in vitro

- digestibility of a new forage sorghum variety, Tal, at two maturity stages. *Anim. Feed. Sci. Tech.*, 131: 120–132.
- Cassini, P. y La Rocca, F. 2014. *Amaranthus cruentus* L. is suitable for cultivation in Central Italy: field evaluation y response to plant densities. *Italian Journal of Agronomy* 9:166-175.
- Castellani, O. F., Martínez, E. N., Añóm, M. C. 1998. Structural modifications of an Amaranth globulin induced by PH y Na Cl. *J. Agric Food Chem.*46.
- Castellani, O. F., Martínez, E. N., Añóm, M. C. 1999. Role of disulfide bonds upon structural stability of an amaranth globulin. *J. Agric Food Chem.*47. p. 3001-3003.
- Cervellini, J. E., Braun, R. O., Estéves, R. y. Covas, F. 1994. Efecto de la sustitución parcial del maíz (*Zea mays* L.) por grano de amaranto (*A. mantegazzianus* Passer) suministrado en dos modalidades integrando la dieta de terminación de pollos parrilleros. *El amaranto y su potencial* (1-2): 24-25.
- Chagaray, A. 2005. Estudio de factibilidad del cultivo del Amaranto. Dirección Provincial de programación del Desarrollo Ministerio de Producción y Desarrollo Gobierno de la Provincia de Catamarca. Perú.  
[http://www.academia.edu/7599720/Estudio\\_de\\_Factibilidad\\_del\\_Cultivo\\_del\\_Amaranto](http://www.academia.edu/7599720/Estudio_de_Factibilidad_del_Cultivo_del_Amaranto).  
visitado: 12/08/17
- Chan, K.F. y Sun, M. 1997. Genetic diversity y relationships detected by isozyme y RAPD analysis of crop y wild species of *Amaranthus*. *Theor. Appl. Genet.* 95:865-873.
- Chauhan, B. S. y Abugho, S. B. 2013. Effects of water regime, nitrogen fertilization, y rice plant density on growth y reproduction of lowly weed *Echinochloa crus-galli*. *Crop Protection*, 54 142-147.
- Cheeke, P.R., y Bronson J. 1979. Feeding trials with *Amaranthus* grain, forage y leaf protein concentrations. P. 5-11. In Proc. 2nd Sept. 1979. Rodale Press, Emmaus. PA.
- Chen, S., Paredes-López, O. 1997. Isolation y characterization of de 11S globulin from amaranth seeds. *J. Food Biochem.*, 21. p. 53-65.
- Cherney, D.J.R. 2000. In Forage Evaluation in ruminant nutrition. CABI Publishing, Wallingford, UK. p 281-300.

- Chew, Y.H., Wilczek, A.M., Williams, M., Welch, S.M., Schmitt, J., Halliday, K.J. 2012. An augmented Arabidopsis phenology model reveals seasonal temperature control of flowering time. *New Phytol.* 194: 654–665.
- Coimbra, S. y Saleman, R. 1994. *Amaranthus hypochondriacus*; seed structure y localization of seed reserves. *Ann. Bot.* 74:373-379.
- Colombato, D. 2000. Análisis de alimentos: Aplicaciones prácticas. Fac. Agronomía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.  
<https://es.scribd.com/document/130621631/APLICACIONES-PRACTICAS-DE-ANALISIS-DE-ALIMENTOS> visitado 17/7/17
- Costea, M. y Tardif, F. J. 2003. The name of the amaranth: histories of meaning. *SIDA* 20(3): 1073-1083.
- Covas, G. 1994. Perspectiva del cultivo de los amarantos en la República Argentina. EEA, INTA Anguil. Santa Rosa, La Pampa, Argentina, Publicación Miscelánea. No. 13 p. 10.
- Craufurd, P.Q., Wheeler; T.R. 2009. Climate change y the flowering time of annual crops, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 60, Issue 9.p 2529–253.
- Cubero, J. I. 2003. Introducción a la Mejora Genética Vegetal. 2º Edición. Ed. Mundi Prensa..
- Cusicanqui, J. A. y Laur, J. G. L. 1999. Plant Density y Hybrid Influence on Corn Forage Yield y Quality Vol. 91.No. 6, p.911-915.
- De la Cruz-Guzmán, G. H, Arriaga-Frías, A., Myujano-Piña, M., y González Moreno, S. 2010. Efecto de la sequía sobre algunas variables hídricas y morfométricas en cinco genotipos de amaranthus. *Idesia (Arica)*, 28 (3), 87-95.
- De Varennes, A., Melo Abreu, J.P. y Ferreira, M. E 2002. Predicting the concentration y uptake of nitrogen, phosphorus y potassium by field grown green beans under non-limiting conditions. *Eur. J. Agron.*, 17: 63-72.
- Dehghanisanij, H.; Nakhjavani, M., Tahiri, A.Z. y Anyoji, H. 2009. Assessment of wheat y maize wáter productivities y production funcion for cropping system decisions in arid y semiarid regions, *Irrig. Y Drain*, 58:105-115.
- Díaz Ortega, A. C.; Escalante Estrada, J. A.; Trinidad Santos, A.; Sánchez García, P.; Mapes Sánchez, C.; 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*, vol. 22, núm. 1. p. 109-116.

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Domínguez, A., Martínezb, R.S. De Juana, J.A., Martínez Romero, A., Tarjueloa, J.M. .2012. Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 107: 42– 53.
- Dosio, G.A.A., Tardieu, F., Turc, O. 2011. Floret initiation, tissue expansion y carbon availability at the meristem of the sunflower capitulum as affected by water or light deficits. *New Phytol* 189: 94–105.
- Downton, W. J. S. 1973. *Amaranthus edulis*: A high lysine grain amaranth. *World Crops*, 25(1):20.
- Duncan, A. E. 1980. Grain amaranth: Characteristics y culture. New Crops Department. Organic Gardening y Farming Research Center. Report 80-1. Rodale Press mc. USA.
- Dworak, Thomas; Maria Berglund; Cornelius Laaser 2007: EU Water saving potential (Part 1 – Report). ENV.D.2/ETU/2007/0001r. Berlin.  
[https://www.ecologic.eu/sites/files/project/2013/917\\_water\\_saving\\_1.pdf](https://www.ecologic.eu/sites/files/project/2013/917_water_saving_1.pdf) visitado 18/6/17
- Acevedo, E.H., Silva, P.C., Silva, H.R., Solar, B.R. 1999. Wheat production in Mediterranean environments. In *Wheat: Ecology and Physiology of Yield Determination*. p. 295–323. Eds E.H. Satorre and G.A. Slafer. New York: Food Products Press.
- Edwards, A. D. 1981. The effect of plant density on the agronomic qualities of *Amaranthus cruentus*, *Amaranthus hypochondriacus*, *Amaranthus hybridus* y *Amaranthus caudatus*. New Crops Department. Organic Gardening y Farming Research Center. Rodale Press, Inc. Emmaus, PA.USA. p. 19–23.
- Edwards, A.D. y B. Volak. 1980. Grain amaranth: optimization of field population density. In: *Proc. 2nd Amaranth Conference*. Rodale Press, Emmaus, PA. p. 91-94.
- Edwards, G. E.; Walker, D. A. 1983. C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> mechanisms y cellular y environmental regulation of photosynthesis. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 552 pp
- Ejieji, C.J., Adeniran, K.A. 2010. Effects of water y fertilizer stress on the yield, fresh y dry matter production of grain amaranth (*Amaranthus cruentus* L.). *Aus. J. Agric. Eng.* 1(1):18-24.

- Elbehri, A., Putnam, D. H., Schmitt, M., 1993. Nitrogen fertilizer y cultivar effects on yield y nitrogen use efficiency of grain amaranth. *Agron. J.* 85:120–128.
- English, M. y Raja, S.N. 1996. Perspectives on deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 32: 1-14.
- Eppendorfer, W. H., Bille, S. W. y Patipanawattana, S. 1985. Protein quality y amino acid-protein relationships of maize, sorghum y rice grain as influenced by nitrogen, phosphorus, potassium y soil moisture stress. *J. Sci. Food Agric.*, 36: 453–462.
- Erley, G. S., Kaul, H. S., Markus, K., Aufhammer, W. 2005. Yield y nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, y buckwheat under differing nitrogen fertilization. *Europ. J. Agronomy* 22: 95–100.
- Ertek, A., Kara, B. 2013. Yield y quality of sweet corn under deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 129:138-144.
- Escalante, J. A. 1995. Aprovechamiento del recurso agua en cultivos de secano. Alternativas tecnológicas. Agroproductividad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Escudero, N. L.; Arellano, M. L.; Luco, J. M.; Gimenez, M. S. y Mucciarelli, S. I. 2004. Comparison of the chemical composition y nutritional value of *Amaranth cruentus flour* y its protein concentrate. *Plant Food for Human Nutrition* 59: 15-21.
- Esmailian, Y., Ghanbari, A., Babaeian, M., Tavassoli, A. 2011. Influence of organic y inorganic fertilizers y wastewater irrigation on yield y quality traits of corn. *American-Eurasian Journal of Agricultural y Environmental Sciences* 10(4):658- 666.
- Espitia, R. E. 1991. Recursos genéticos de Amaranto (*Amaranthus* spp.). En: Ortega, P.R., H.G. Palomino, G.F. Castillo, H.V. González y M.M. Livera. (Eds.). Avances en el estudio de los recursos fitogenéticos de México, SOMEFI, Chapingo, México. p. 197.
- Espitia, E. 1992. Amaranth germplasm development y agronomic studies in Mexico. En: J.R. Bale y C.S. Kauffman (Eds.) Special issue on grain amaranth: new potential for an old crop. *Food Reviews International* 8: 71-86.
- Espitia, R. E. 1994. Breeding of grain amaranth. En: Paredes López, O. (ed.). Amaranth biology, chemistry y technology. CRC Press, Boca Raton, FL. USA. p. 23-28
- Estrada, L.A., Sahagún, C. 2001. Guía para Cultivar Amaranto en el Distrito Federal. Folleto para Productores No. 1. Sagarpa, Inifap, Cir-Centro. Cevamex, Chapingo, Estado de México.p.16.

- Estrada Zuniga, R. 2011. "Kiwicha alimento nuestro para el mundo". INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria) Programa Nacional de Investigación en Cultivos Yinos Estación Experimental Agraria Yenes Cusco. <http://quinua.pe/wp-content/uploads/2014/09/pub-p168-pub.pdf> .Visitado 1/3/15.
- FAO, 2002. Los fertilizantes y su uso. p86. ISBN: 9253044144. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/x4781s/x4781s00.pdf>
- FAO, 2006. FAOSTAT data. In: FAO Statistical Databases FAOSTAT. [www.fao.org](http://www.fao.org)
- FAO, 2013. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. ISBN 978-92-5-307671-0 (edición impresa) E-ISBN 978-92-5-307672-7 (PDF). <http://www.fao.org/docrep/018/i3300s/i3300s.pdf>. Sitio visitado 29/2/15.
- Farhad W, Cheema MA, Saleem MF, Radovich T, Abbas F, Hammad HM, Wahid MA (2013). Yield y quality response of maize hybrids to composted poultry manure at three irrigation levels. *International Journal of Agriculture y Biology* 15:181-190.
- Fasina, A. S., Awe, G. O. y Aruleba, J. O. 2008. Irrigation suitability evaluation y crop yield-An example with *Amaranthus cruentus* in Southwestern Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 2 (7), p. 61-66.
- Fasinmirin, J.T., Olufayo, A.A., Oguntunde, P.G., Oguntuase, A.M., 2009. Parametrizing simple model between yield and evapotranspiration for *Amaranthus cruentus* under drip and sprinkler irrigations. *Int. J. Plant Production*, 3 (1), 75-90.
- Feine, L. B., Harwood, R., Kauffman, S. C. y Senft, J. P. 1979. Amaranth: gentle giant of the past y the future. En: G. A. Ritchie (Ed.). *New Agricultural Crops*. AAAS Selected Symposium 38. Westview Press, Boulder, CO. p. 41-63.
- Fereres, A., y Soriano, M..A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural wáter use. *J. Exp. Botany* 58:147-159.
- Fernández, V., Takahashi, Y., Le Gourrierc, J., Couply, G. 2016. Photoperiodic y thermosensory pathways interact through CONSTANS to promote flowering at high temperature under short days. *The Plant journal: for cell y molecular biology*. Vol 86. Issue 5.p. 426–440.
- Ferrarotto, M. S. 2010. Respuesta de pira (*Amaranthus dubius* Mart. ex Tell.) y amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) al déficit hídrico. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 36(1): 20-27.

- Fitterer, S.A., Johnson, B.L. y Schneiter, A.A. 1996. Grain amaranth harvest timeliness in eastern North Dakota. In: J. Janick, Editor, Progress in New Crops, ASHS Press, Alexyria, VA, p. 220-223.
- Freer, M., Dove, H. 2002. Sheep Nutrition, 1st ed. CABI Publishing, Wallingford, Oxon, UK, p. 385
- Fuentes Fernández, W., Mollo Porco, N., Correa, W. 2014. Plagas y Enfermedades del Cultivo De Amaranto. Guía Práctica.  
<http://www.proinpa.org/tic/pdf/Granos%20y%20cereales%20yinos/amaranto/Plagas%20y%20Enfermedades%20Amaranto.pdf>.
- Fuentes Yague, J.L., 1998. Técnicas de Riego. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa . Madrid. ISBN: (Ed. Mundi.Prensa). ISBN 84-7114-785-8.
- Fuller, H. J. 1949. Photoperiodic responses of *Chenopodium quinoa wild* y *Amaranthus caudatus* L. Am. J. Bot. 36:175 – 180.
- Gallego, J.J., Neira, Zilli, F., Miñón, D.P., Barbarossa, R.A., y Margiotta, F. 2015. Efecto del sistema de siembra-híbridos sobre la acumulación de forraje de sorgos graníferos para ensilaje. Revista Argentina de Producción Animal Vol 35 Supl. 1: 139-257
- Garciadiego, R.; Hernández, H., Guerra, G. 1998. Amaranto: Historia y Promesa Artículo publicado en Tehuacán: Horizonte del Tiempo Vol. 1 Patrimonio Histórico de Tehuacán A. C. México. p 529.
- García Pereyra, J. 2004. Contribuciones tecnológicas preliminares para la producción de grano y forraje de amaranto (*Amaranthus* spp) en el Norte y Noreste de México. Tesis Doctoral Universidad Autonoma de Nuevo Leon Facultad de Agronomía.
- García Pereyra, J., Valdés Lozano, C., Olivares Saenz, E. , Alvarado Gómez, O., Alejandro Iturbide, G., Salazar Sosa, E., Medrano Roldán, H. 2009. Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus* spp.) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. ΦYTON.78: 53-60. ISSN 0031 9457.
- Gardner, W. H.1986. Methods of soil analysis.Part 1. Ed.Klute. A.S.A.Inc.SSSA Inc.Madison Wisconsin.
- Gimplinger, D. M., Dobos, G. R. Schönlechner, Kaul, H. P. 2007. Yield y quality of grain amaranth (*Amaranthus* sp.) in Eastern Austria. Plant soil environ., 53 (3): 105–112

- Gimplinger, D.M.; Erley G.S.; Dobos G.; Kaul H.P. 2008. Optimum crop densities for potencial yield y harvestable yield of grain amaranth are conflicting. *Europ. J. Agronomy* 28: 119-125.
- González, T. F. y Rojo, H. C. 2005. *Prontuario de Agricultura. Cultivos Agrícolas*. Editorial: Grupo Mundi- Prensa. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). ISBN 84-491-0669-9 (MAPA). ISBN 84-8476-248-3 (Mundi- Prensa). Madrid, España; p.154.
- González Jiménez, A. K.; Guadarrama, O. 2005. Efecto del abono orgánico en el cultivo de amaranto a diferentes fechas de siembra en Temoac, Morelos. [www.uaemex.mx/Red\\_Ambientales/docs/memorias/.../CBC-18.pdf](http://www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/.../CBC-18.pdf).
- Graybill, J.S., Cox, W.J., y Otis, D.J. 1991. Yield y quality of forage maize as influenced by hybrid, planting date, y plant density. *Agron. J.* 83:559–564.
- Green, D. G., Read, D. W. L. 1983. Water use efficiency of corn, sunflower y wheat with limiting soil moisture. *Canadian Journal of Plant Science* 63(3): 747-749.
- Green, P. y Cellier, C. 2007. Celiac Disease. *N. Engl. J. Med.* 357:17. 1731 – 1743
- Grubben, G. J .H. 1975. Culture of the amaranth, a tropical leaf vegetable, with special referente to South Dahomey. *Medelelingen Lyboughogescholl Wageningen* 75 (6) 223.
- Grubben, G. J. H. y Van Sloten, D.H. 1981. Genetic resources of amaranths. A global plan of action. AGP: IBPGR 80/2. International Board for Plant Genetic Resources. Rome, Italy. p.57.
- Guillen Portal, F. R., Baltensperger, D. D. y Nelson, L. A. 1999. Plant population influence on yield y agronomic traits in ‘Plainsman’ grain amaranth. In: J. Janick, Editor, *Perspectives on New Crops y New Uses*, ASHS Press, Alexyria, VA. P. 190–193.
- Gupta, S., y Larson, W. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, y bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
- Gupta, V. K. y Gudu, S. 1991. Interspecies hybrids y possible phylogenetic relations in grain amaranths. *Euphytica* 56:33-38.
- Gupta, V. K y Thimba, D. 1992. Grain Amaranth: A promising crop for marginal areas of Kenya. *Food Reviews International* 8(1): 51-59.
- Guttieri, M.J., Ahmad, R., Stark, J.C., Souza, E., 2000. End-use quality of six hard red spring wheat cultivars at different irrigation levels. *Crop Science* 40, 631–635

- Hammad, H.M., A. Ahmad, W. Farhad, F. Abbas, K. Qasim and S. Saeed. 2013. Nitrogen stimulates phenological traits, growth and growing degree days of maize. *Pak. J. Agri. Sci.* 50:337-343.
- Han, F., Ullrich, S.E., Romagosa, I., Clancy, J.A., Froesth, J.A. and Wesenberg, D.M. 2003. Quantitative genetic analysis of acid detergent fibre content in barley grain. *J. Cereal Sci.*, , 38, 167–172.
- Hara, T, Kawano, S., Nagai, Y. 1988. Optimal reproductive strategy of plants, with special reference to the modes of reproductive resource allocation. *Plant Species Biol* 3:43–59.
- Hass, P.W. 1983. Amaranth density report. Rodale Research Center Report No. RRC/NC-83-8. Rodale Press, Emmaus, PA.
- Hauptli, H. 1977. Agronomic potential y breeding strategy for grain amaranths. In *Proc. Amaranth Sem.*, 1st, Maxatawny, PA. Rodale Press, Emmaus, PA. p.71–81.
- Hauptli, H. y Jain, S. 1977. Amaranth y meadowfoam: Two new crops *California Agriculture* 3 (9): 6 – 7.
- Hauptli, H. y S. Jain. 1985. Genetic variation in outcrossing rate y correlated floral traits in a population of grain amaranth (*Amaranthus cruentus* L.). *Genética* 66:21–27.
- Henderson, T. L. 1993. Agronomic evaluation of grain amaranth in North Dakota. Thesis Ph.D. North Dakota State, North Dakota, USA
- Henderson, T. L., Schneiter, A.A. y Rively, N. 1993. Row spacing y population effects on yield of grain amaranth in North Dakota. In: J. Janick y J.E. Simon (eds.), *New crops*. Wiley, New York. p. 219-221.
- Henderson T, Johnson B; Schneiter A. 2000. Row spacing, plant population, y cultivar effects on grain amaranth in the northern great plains. *Agron. J.* 92: 329-336.
- Horie, T. 1994. Crop ontogeny and development. In: Boote KJet al., eds. *Physiology and determination of crop yield*. Madison, WI: CSSA-ASA-SSSA. p. 153-180.
- Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Hsiao, T.C., y Acevedo, E. 1974. Plant responses to water deficits, water use efficiency y drought resistance. *Agric. Meteor.* 14: 59-84.
- Hunziker, A.T. 1952. Los pseudocereales de la agricultura indígena de América, Direc. Public. Universidad Nacional, Córdoba, Argentina.p.104.

- Hunziker, A. T. 1991. Sinopsis de las especies silvestres de *Amaranthus* del continente americano, con especial referencia a las monoicas. Primer Congreso Internacional del Amaranto. Oaxtepec, Morelos. México. p. 22.
- Iannucci, A., Terribile, M.R., Martiniello, P. 2008. Effects of temperature y photoperiod on flowering time of forage legumes in a Mediterranean environment Field Crops Research. Vol.106, Issue 2. P. 156-162.
- Ibrahim, M., Ayub, M., Tanveer, A., Yaseen, M. 2012. Forage quality of maize y legumes as monocultures y mixtures at different seed ratios. The Journal of Animal y Plant Sciences, 22(4): 987-992 ISSN: 1018-7081
- IDEVI. 2010. El proyecto. Nota en página web institucional del Instituto de Desarrollo del Valle Inferior. <http://www.idevi.rionegro.gov.ar/> (último acceso 06/03/2010).
- Igbadun, H.E. y Oyebode, M.A. 2000. Effect of Delayed Irrigation at Critical Growth Stage on Yield of Wheat. Savannah Journal of Agricultural Mechanization. 2(1):63–64.
- INTA 2013. Proyectos Regionales con Enfoque Territorial: Contribución al desarrollo territorial de la zona atlántica de Río Negro. EEA Valle inferior del Río Negro (convenio Provincia de Río Negro – INTA). Disponible en: <http://inta.gob.ar/proyectos/PATNOR-1281308>
- Irving, D. W., Betschart, A. A. y Saunders, R. M. 1981. Morphological studies on *Amaranthus cruentus*. J. FoodsScience 46: 1170-1173.
- Islam, M.R., Garcia, S.C., Horadagoda, A. 2011. Effects of irrigation y rates y timing of nitrogen fertilizer on dry matter yield, prop ortions of plant fractions of maize y nutritive value y in vitro gas production characteristics of whole crop maize silage. Animal Feed Science y Technology , Volume 172 , Issue 3. P. 125 – 135
- Itenov, K. y Jacobsen, S. E. 1996. Field y Laboratory Internal Report: Amaranth. Danish Institute of Plant y Soil Science, Roskilde. P.10.
- Jacquelin, L. M., Lovet, L. A. y Elisei, J. 2011. El cultivo de Amaranto. Trabajo de investigación. INTA Pergamino. Pp 1-8 (Disponible en línea: [http://elnuevoagro.com.ar/files/717852\\_2011\\_08\\_15\\_Amaranto2011\\_INTAPerg.pdf](http://elnuevoagro.com.ar/files/717852_2011_08_15_Amaranto2011_INTAPerg.pdf))
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.R., Dashtaki, M., 2013. Response of a new y a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation y planting density. Agric. Water Manage. 117, 62–69.

- Jehan, B., Shafi, M., Yousaf, M., Shah, H.U. 2010. Physiology phenology y yield of sunflower (autumn) as affected by NPK fertilizer y hybrids. *Pakistan J. Bot.* 42 (3): 1909-1922.
- Jensen, K.B., Waldron, B.L., Asay, K.H., Johnson, D.A. y Monaco, T.A. 2003. Forage Nutritional Characteristics of Orchardgrass y Perennial Ryegrass at Five Irrigation Levels Published in *Agron. J.* 95:668–675.
- Johnson, B. L., y Henderson, T. L. 2002. Water Use Patterns of Grain Amaranth in the Northern Great Plains. *Agron. J.* 94:1437-1443.
- Johnson, C.R., Reiling, B.A., Mislevy, P., Hall, M.B. 2001. Effects of nitrogen fertilization y harvest date on yield, digestibility, fiber, y protein fractions of tropical grasses. *J Anim Sci.* 79(9):2439-48.
- Jomo, O. M., Netondo, G.W., Musyimi, D. M. 2015. Growth Changes of Seven *Amaranthus* (spp) During the Vegetative y Reproductive Stages of Development as Influenced by Variations in Soil Water Deficit. *International Journal of Research y Innovations in Earth Science* Volume 2, Issue 6, ISSN (Online) : 2394-1375
- Joshi, B. D. y Rana, R. S. 1991. Grain Amaranths, the Future Crop. *Shimla Science Monogr.* 3, National Bureau of Plant Genetic Resources, New Delhi, India. p 165. <http://krishikosh.egranth.ac.in/bitstream/1/2035794/1/25.pdf> visitado 8/12/16.
- Juan, R., Pastor, J., Alaiz, M., Megías, C., y Vioque, J. 2007. Caracterización proteica de las semillas de once especies de amaranto. *Grasas y Aceites*, 58 (1), 49-55.
- Jung, H.G. y Allen, M.S. 1995. Characteristics of plant cell walls affecting intake y digestibility of forages by ruminants. *Journal of Animal Science* 73:2774-2790.
- Kang, S., Shi, W., Zhang, J. 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Res* 67: 207–214.
- Kang, S.Z. y Zhang, J. 2004. Controlled partial root-zoner irrigation: its physiological consequences y impacto on water use efficiency. *J. Exp. Bot.* 55:2437-2446.
- Karasu, A., Kuşcu, H, ÖZ, M., Bayram, G. 2015. The Effect of Different Irrigation Water Levels on Grain Yield, Yield Components y Some Quality Parameters of Silage Maize (*Zea mays indentata* Sturt.) in Marmara Region of Turkey . *Karasu A et al. / Not Bot Horti Agrobo.* 43(1):138-145.

- Kauffman, C. S., Bailey, N. N., Volak, B.T., Weber, L. E. y Volk, N. R. 1984. Amaranth grain production Guide. Rodale Research report NC-83-6. Rodale press, Inc., Emmaus, Pennsylvania, USA
- Kauffman, C. S. y Hass, P. W. 1984. Grain amaranth: an over view of research y production methods. Rodale Press Inc. Emmaus, PA.
- Kauffman, C.S. y Weber, L.E. 1990. Grain amaranth. En: Janick, J. y Simon, J.E. (eds.), p. 127-139. Advances in new crops. Timber Press, Portly, OR.
- Kaul, H. P., Aufhammer, W., Laible, B., Nalborczyk, E., Pirog, S., y Wasiak, K. 1996. The suitability of amaranth genotypes for grain y fodder use in Central Europe. Die Bodenkultur, 47: 173-182.
- Kawano, S. y Miyake, S. 1983. The productive y reproductive biology of flowering plants. V. Life history characteristics y survivorship of *Erythronium japonicum* Oikos 38, 129--49.
- Kelley, J. 2011. Growth y development. In: Grain sorghum production hybook. (Eds). Espinoza, L., y J. Kelly. Coop. Ext. Serv. University of Arkansas. MP297. 25.
- Kenneth J. M., y Jung, H. J. G. 2001. Lignin y Fiber Digestion. Journal of Range Management, 54(4), 420–430. <http://doi.org/10.2307/400311>.
- Kering, M. K., Guretzky, J., Funderburg, E. y Mosali, J. 2011. Effect of Nitrogen Fertilizer Rate y Harvest Season on Forage Yield, Quality, y Macronutrient Concentrations in Midly Bermuda grass Published in Communications in Soil Science y Plant Analysis 42:1958–1971.
- Kern Jeffrey, S. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. Soil Science Society of America Journal 59: 1134-1141.
- Khyaker, L., Masum, A. S. M. G., Akond, S. O. 2009. Air temperature y sunlight intensity of different growing period affects the biomass, leaf color y betacyanin pigment accumulations in red amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) Journal of Central European Agriculture Vol 10 No 4.
- Kho, R. M. 2000. On crop production y the balance of available resources. Agric. Ecosystem. Environ. 80: 71-85.
- Kigel, J. 1994. «Development y Ecophysiology of Amaranths», en: Amaranth biology, chemistry, y technology, capítulo 4. Ed. Octavio Paredez–López. p. 39–73.

- Kigel, J. 1996. Biotechnology for an Ancient Crop: Amaranth. In Amaranth Biology, chemistry y technology. Chapter 4. O. Paredez López. (ed). CRC. Pres Inc. Pp223 ISBN: 0849353742, 9780849353741.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: A. Klute (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd edition Agron. Monogr. 9. ASA y SSSA, Madison, WI. p. 635-661
- Koller, D.; Kigel, J. y Ovadia, S. 1977. The facultative photoperiodic response in the reproductive development of *A. retroflexus* L.: Changes in the dose response during ontogeny. *Planta* 137:133-138.
- Komen, J. 1992. Grains for the tropical regions. *Biotechnology y Development Monitor*. Publication of the Ministry of Foreign Affairs y the University of Amsterdam. The Netherlands. 10:3.
- Kramer, P.J. 1983. Drought Tolerance y Water Efficiency”, en: *Water Relations of Plants*, Nueva York, Academy Press. p. 390-415.
- Kübler, E., Kaul, H.P., Aufhammer, W. 2002. Comparative study of crop sty establishment y dry matter production of the pseudocereals buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus* sp.) y the cereals millet (*Panicum miliaceum*) y tef (*Eragrostis tef*) in a marginal environment. *Die Bodenkultur* 53 (1), 29–38.
- Kulakow, P. A. y Jain, S. K. 1990. Grain-amaranth-crop species, evolution y genetic, in Proc. 4th Natl. Symp., Amaranth: Perspectives on Production, Processing y Marketing, Minneapolis, MN. August 23-25. p.105.
- Lavini, A., Pulvento, C., D'Yria, R., Riccardi, M., Jacobsen, S.E. 2016. Effects of saline irrigation on yield y qualitative characterization of seed of an amaranth accession grown under Mediterranean conditions. *Journal of Agricultural Science* 154 (5), p. 858-869.
- Lehmann, J. W. 1990. The potential of grain amaranths in the 1990s y beyond. en: Proc. 4th National Amaranth Symposium: Perspectives on production, processing, y marketing. Minneapolis, MN. 23–25 Univ. Minn., St. Paul, MN. p. 1–7
- Lehmann, J. W.; Putnam, D. H.; Qureshi, A. A. 1994. Vitamin E Isomers in Grain Amaranths (*Amaranthus* spp.). *Lipids*. 29:177-181.
- Li, L., Li, X., Liu, Y., y Liu, H. 2016. Flowering responses to light y temperature. *Sci China Life Sci* 59, 403–408. doi: 10.1007/s11427-015-4910-8

- Liu, F, Stützel, H. 2002a. Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to soil drying. *Eur J Agron*; 16:137–50.
- Liu, F., Stützel, H. 2002b. Leaf expansion, stomatal conductance, y transpiration of vegetable amaranth (*Amaranthus sp.*) in response to soil drying. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 127, 878–883.
- Liu, F.L., Stützel, H. 2004. Biomass partitioning, specific leaf area, y water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to water stress. *Sci. Hortic.* 102, 15- 27.
- Lockhart, J.A. 1965. An analysis of irreversible plant cell elongation. *J Theor Biol* 8: 264–275.
- López, L. R. 1989. Respuesta del cultivo de arroz de riego a la fertilización con potasio en balance con nitrógeno y fósforo en la sabana de Balancán, Tabasco. CicloO-I/1987-1988. En: Evaluación 1988 y Programación 1989 de la Red de Cereales de Grano Pequeño. Informe Técnico. SARH\_INIFAP-CIFAPTAB-CEFAPHUI. Huimanguillo, Tabasco.p. 162-186.
- López, Y. N., Alejyro, B. L., John, D. F., Eulogio, P. B., 2004. Light intensity y activity of trypsin inhibitors in amaranth leaves y seeds. *Rev Fitotec Mex.* 27(2): 127-132.
- Mac Neish. R.S. 1964. Ancient mesoamerican civilization *Science* 143 (3606): 531 – 537.
- Mahmoud, E.A., Ramadan, B.S.H., Bekheet ,M.A., y Gomaa, M.A. 2013. Effect of Nitrogen Fertilization y Plant Density on Productivity y Quality of Sweet Sorghum. *American-Eurasian J. Agric. y Environ. Sci.*, 13 (5): 654-659, ISSN 1818-6769.
- Mahmut D., Comakli, D. 2011. Effects of fertilization on forage yield y quality in range sites with different topographic structure. *Turkish Journal of Field Crops.* 16(1): 15-22
- Maiztegui, J. 2008. Los alimentos. MV. MSc Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Nacional del Litoral pp:3-6
- Makinde, E.A, Ayeni, L.S., Ojeniyi, S.O., Odedina, J.N. 2010. Effect of organic, organomineral y NPK fertilizer on nutritional quality of *Amaranthus* in Lagos, Nigeria. *Researcher* 2:32–6.
- Makus, D. J., 1990. Applied N affects vegetable y seed quality. In: *Proc. Natl. Amaranth Symp.* 4 th Perspectives on Production, Processing y Marketing, Minneapolis, MN. 23-25 Aug. 1990. Min. Ext. Serv., St. Paul., pp: 187-188.
- Malligawad, L.H.; Patril, V.C. 2001. Effect of plant density y planting geometry on growth y yield of grain amaranths . *Karnataka j. Agril.Sci.* 14(1): 11-17.

- Mapes Sánchez., E. C. y Espitia, E. R. 2010. Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género *Amaranthus* cultivadas y de sus posibles parientes silvestres en México. IB-UNAM, INIFAP-CE Bajío.
- Margiotta, F. A.; Martínez, R. M.; Iglesias, H.; Arriaga, O.; Chidichimo, H. O., Sempe, M. E. 1988. Fertilización de maíz bajo riego en el Valle inferior de Río Negro. Actas IV Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. pag:106-112. [http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/5\\_agrarias/a\\_pdf/a\\_070.pdf](http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/5_agrarias/a_pdf/a_070.pdf)
- Makus, D. J. 1990. Composition y nutritional value of vegetable Amaranth as affected by stage of growth, environment y method of preparation. Proceedings of the Fourth Amaranth Symposium. Minnesota Extension Services, Minnesota Agriculture University St. Paul.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London.
- Martin, D. M. 2009. Información Técnica N° 27: Estadísticas climáticas del valle de Viedma. Año 4-N°9. E.E.A. Valle Inferior-Convenio Provincia de Río Negro-INTA
- Martineau, J. R. 1985. Requerimientos del Amaranto. El Amaranto 28 (Guatemala.) n°. 4: 3-4.
- Martínez, R. S.; Margiotta, F.; Reinoso, L.; Martínez, R. M. 2012. Buscayo alcanzar altos rendimientos del cultivo de maíz: experiencias en los valles Norpatagónicos. 3ª Reunión Internacional de Riego. INTA Manfredi. p139-155.
- Masariramb, M.T., Dlamini, Z.; Manyatsi, A.M. Wahome, P.K., Oseni, T.O., y Shongwe, V.D. 2012. Soil Water Requirements of Amaranth (*Amaranthus hybridus*) Grown in a Greenhouse in a Semi-Arid, Sub-Tropical Environment. American-Eurasian J. Agric. y Environ. Sci., 12 (7): 932-936, 2012 ISSN 1818-6769.
- Masoni, A. y Ercoli, L. 1994. Influencia de la época de cosecha sobre el rendimiento de concentrado de proteína foliar de amaranto. El amaranto y su potencial 1: 17-23.
- Masotta, H. T 1970. Reconocimiento detallado de suelos con fines de riego en el área de influencia del canal secundario VII Valle Inferior del Río Negro, Argentina. P 98 en Serie Técnica Nro 05 1970. Imprenta: imprenta del instituto de Desarrollo del Valle Inferior del Río Negro- IDEVI, 30 de oct de 1973.
- Matteuci, S. D. 1998. Potencial productivo en la Pampa Ondulada, Argentina. Comportamiento de seis germoplasmas de amaranto. Rev. Fac. Agron (Luz) 15: 560-570.

- Matteucci, S. D. y Pla, L. 1998. Estructura de correlaciones y selección de descriptores en la evaluación de germoplasmas de amaranto. Aceptado para publicación en la Rev. Fac. Agron. (LUZ). 15(6): 545-559.
- Mazón, N., Peralta, E., Rivera, M., Subia, G., Tapia, C. 2003. Catálogo del banco de germoplasma de amaranto (*Amaranthusspp.*) del INIAP – Ecuador. Programa Nacional de Leguminosas y Granos Yinos, Departamento Nacional de Recursos Filogenéticos y Biotecnología, Estación Experimental Santa Catalina Quito, Ecuador. 98 p.
- McDonald, P., Henderson, A.R., Herson, S.J.E.1991. The Biochemistry of Silage. 2nd ed. Chalcombe Publication, Marlow, UK.
- McMaster, G. S., Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural y Forest Meteorology* 87, 291–300. doi: 10.1016/S0168-1923(97)00027-0.
- Miller, P., Lanier, W., Bryt, S. 2001. Using growing degree days to predict plant stages. *Field crops Montana State University, Extension Service*, July 2001, E-5, 8 pp.
- Misra, P.N., Pal M., Pyey, R.M., 1985. Estudios sobre el efecto de variación en la densidad de plantas, sobre el crecimiento y rendimiento del amaranto de semilla (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *El amaranto y su potencial*, ed. Por Archivos Latinoamericanos de Nutrición (3), 2-4.
- Mlakar, G.S., Turinek, M., Jakop, M., Bavec, M., Bavec, F. 2009. Nutrition value and use of grain amaranth: Potential future application in bread making. *Agricultura*, 6, 43-53
- Mlakar, S. G.;Jakop, M.; Turinek, M.; Robačer, M.; Bavec, M.; Bavec, F. 2010. Protein content y amino acid composition of grain amaranth depending on growing season, sowing date y nitrogen supply. 45. hrvatski i 5. Međunarodni simpozij agronoma, 15-19 veljače, Opatija, Hrvatska. *Zbornik Radova* pp.727-732 ref.19
- Mlakar, S. G; Bavec, M., Jakop, M. y Bavec, F. 2012. The Effect of Drought Occurring at Different Growth Stages on Productivity of Grain Amaranth *Amaranthus cruentus* G6. *Journal of Life Sciences* (6) 283-286.
- Molden, D. 1997. Accounting for wáter use y productivity. SWIM Paper I. Colombo, Sri Lanka International Irrigation Management Institute. ISBN 92-9090-349.
- Monteros, C., Nieto, C., Caicedo, C., Rivera, M. y Vimos, C. 1994. INIAP-Alegría. Primera variedad mejorada de amaranto para la Sierra ecuatoriana. CIID-Canad, INIAP. Pág.24

- Morales, E.; Lenbcke, J.; Gram, G. 1988. “Valor Nutricional del Amaranto”, Congreso Internacional sobre cultivos Yinos Quito INAP Pág. 143.
- Morales, P. J. Granados, S. D y Martinez, H. J .S. 1990. Respuesta del amaranto (*Amaranthus hypocondriacus* L.) a la fertilización química y orgánica en condiciones de temporal en dos areas del estado de Tlaxcala. En: El Amaranto (*Amaranthus* Spp). Su cultivo y aprovechamiento. CP. Montecillo, México, pp. 152-174.
- Moreno, F. y Liz, P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía colombiana* 27 (2), 179-191.
- Moshaver, E., Emam, Y., Madani, H., NourMohamadi, G., Sharifabad, H. H. 2015. Comparison of qualitative y quantitative performance of forage crops maize, sorghum y amaranth as affected by planting density y date in fars province, Iran. 4: 2319–5037 ISSN: 2319–4731.
- Moujiri, A. y Arzani, A. 2003. Effects of nitrogen rate y plant density on yield y yield components of sunflower. *J. Sci. Tech. Agric. Nat. Res.*, 7: 115-125.
- Muhammad Ayub, Muhammad Ather Nadeem, Asif Tanveer y Azhar Husnain. 2002. Effect of different levels of Nitrogen y harvesting times on the growth, yield y quality of sorghum foder. *Asian Journal of Plant Sciences*. Volume 1 Number 4: 304-307.
- Mujica S. A., Berti, D. M. y Izquierdo, J. 1997. El cultivo del amaranto (*Amaranthus* spp.): producción, mejoramiento genético y utilización. Oficina de la FAO para America Latina y el Caribe, Santiago Chile. 145 p. Sitio visitado 29/2/15
- Mujica, S. A. y Quillahumán, A. 1989. Fenología del cultivo de la kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.). p. 29-31. En: Curso taller fenología de cultivos yinos y uso de la información agrometeorológica. Puno, 7-10 agosto. INIA, PICA. Perú.
- Myers, R.L. 1996. Amaranth: New crop opportunity. p. 207-220. In: J. Janick (ed.), *Progress in new crops*. ASHS Press, Alexyria, VA. <https://hort.purdue.edu/newcrop/proceedings1996/V3-207.html>
- Myers, R. L. 1998. Nitrogen fertilizer effect on grain Amaranth. *Agron. J.* 90: 597-602.
- NRC: National Research Council. 1984. Amaranth: Modern prospects for an ancient crop. National Academy Press, Washington, DC. EUA. 80 p.
- National Research Council (NCR). 1989. Lost crops of the Incas: Little-known plants of the Yes with promise for worldwide cultivation. National Academy Press, Washington D.C. 415 pp.

- Necoechea, M. H., C.J. Camacho, y Perez, G. R. 1986. Elaboración de una pasta a base de Alegria (*Amaranthus leucocarpus* S.Wats.). p. 459-478. En: Primer Seminario Nacional del Amaranto. Chapingo, México
- Neluheni, K., Du Plooy, C.P. y Mayaba, N. 2007. Yield response of leafy amaranths to different irrigation regimes. Proceedings of the 8th African Crop Science Conference, Volume 8, October 27-31. El-Minia, Egypt, pp: 1619-1623.
- Nielsen, R. L., Thomison, P. R., Brown, G. A., Halter, A. L., Wells, J., y Wuethrich, K. L. 2002. Delayed planting effects on flowering y grain maturation of dent corn. *Agron. J.* 94:549-558.
- Nieto, C. 1986. Análisis del crecimiento y respuesta al fotoperíodo de seis especies de *Amaranthus*. Tesis Mag. Sc. Programa de Posgrado Convenio Universidad de Costa Rica / CATIE, Turrialba (Costa Rica). 101 p. Turrialba Universidad de Costa Rica / CATIE CR.
- Nieto, C. 1990. Identificación de microcentros de variabilidad en quinua, amaranto y chocho en Ecuador INIAP, EE. Santa Catalina. Publicación Miscelánea N° 52. Quito, Ecuador. Proyecto INIAP/IFAD/IPGRI. s.n.t. 15 p.
- Nilsen, E.T., Orcutt, D.M.1996. The physiology of plants under stress: abiotic factors. John Wiley y Sons, New York, USA. 689 p.
- Nordheim Viken, H.,Volden, H., 2009. Effect of maturity stage, nitrogen fertilization y seasonal variation on ruminal degradation characteristics of neutral detergent fibre in timohy (phleum pretense). *Anim. Feed Sci. Technol.*149,30-59.
- Norman, G. 1983. Fisiología, mejoramiento, cultivo y utilización de la soja. Primera edición 1983. editorial hemisferio sur S.A. ISBN 950-504-261-2. pag 356.
- O'Brien, G. K. y Price, M. L. 2008. Amaranth grain y vegetable types. ECHO Technical Note. [www.echonet.org](http://www.echonet.org)
- Olaniyi, J. O., Adelasoye, K. A., Jegede, C. O. 2008. Influence of nitrogen fertilizar on the growth, yield y quality of grain amaranth varieties. *Word Journal of Agricultural Science* 4 (4): 506-513.
- Oliver, G. R., Taboada, S. M. y Barrete, S. M., 2002. Produccion de amaranto con gallinaza en Temoac. Memoria 1er Congreso de Agricultura Conservacionista, San José de Costa Rica. 4p.

- Olsen, S. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture. Circular n°, 939.
- Olufolaji, A.O; Odeleye, F. O. y Ojo, O.D. 2010. Effect of soil moisture stress on the emergence, establishment y productivity of Amaranthus (*Amaranthus Cruentus* L.) Agric. Biol. J. N. Am., 1(6): 1169-1181.
- Omami, E.N. y Hammes, P.S. 2010. Interactive effects of salinity y water stress on growth, leaf wáter relations, y gas exchange in amaranth (*Amaranthus* spp.) New Zealy Journal of Crop y Horticultural Science, 2006, Vol. 34: 33-34.
- Oury, V., Caldeira, C.F., Prodhomme, D., Pichon, J.P., Gibon, Y., Tardieu, F., Turc, O. 2016. Is Change in Ovary Carbon Status a Cause or a Consequence of Maize Ovary Abortion in Water Deficit during Flowering? *Plant Physiol.* 171:997-1008.
- Ozturk, A., Aydin, F., 2004. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *Journal of Agronomy y Crop Science* 190, 93–99.
- Pal, M. y Khoshoo, T.N. 1974. Grain amaranths. In: S. J. Hutchinson (ed.). *Evolutionary studies in world crops. Diversity y change in Indian subcontinent.* Camb Univ Press Engly. pp. 129-137
- Parada, A., y Araya, M.. 2010. El gluten. Su historia y efectos en la enfermedad celíaca. *Rev.Med.Chile* 138:1319-1325.
- Patel, G.N., Patel, P.G.y Patel, J.C. 1994. Effect of nitrogen y phosphorus on yield y quality of forage sorghum (*Sorghum bicolor*). *Indian Journal Agronomy*, 39: 123-125
- Pearson. D; 1993. *Técnicas de laboratorio para el análisis de alimentos;* Editorial Acribia, S.A. Zaragoza (España).
- Pedroza, R. I. 1989. Efecto de la fecha de siembra en cinco variedades de amaranto (*Amaranthus* spp). Tesis Profesional Z. A. UACH. Chapingo, Méx. 81p.
- Peiretti, G. 2010. Amaranto, un cultivo milenario resurge como alternativa. *Revista facultad de agronomia y veterinarios de la UNRC año 2 n°3 ISSN 18533280.*
- Peiretti, E. G. y Gesumaria, J. J. 1991. Efecto del modelo de siembra en amaranto granífero. Análisis de componentes del rendimiento en un cultivar de *Amaranthus cruentus* L. *Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto.* 11(1):21-29

- Peiretti, E.G., Gesumaria, J.J., 1998. Influencia de la distancia entre líneas sobre el crecimiento y rendimiento de amaranto granífero (*Amaranthus* spp.). *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales* 13 (1–2), 139–151.
- Pelleschi, S., Rocher, J. P., Prioul, J. L., 1997. Effect of water restriction on carbohydrate metabolism and photosynthesis in mature maize leaves. *Plant Cell and Environment* 20, 493–503.
- Peri, G. 2004. La agricultura irrigada en Río Negro y su contribución al desarrollo regional. Documentos, presentaciones y reportes del seminario taller sobre desarrollo rural. Banco Mundial, 115 pág.
- Philipp, D., Allen, V. G., Mitchell, R. B., Brown, C. P., y Wester, D. B. 2005. Forage Nutritive Value and Morphology of Three Old World Bluestems under a Range of Irrigation Levels *Crop Science* 45:2258–2268.
- Philippe, S., Mustafa, A. F., Donnelly, D. J., Gélinas, B. 2013. Chemical composition and ruminal nutrient degradability of fresh and ensiled amaranth forage. Vol 93, Issue 15. Pages 3730–3736
- Písaříková, B., Peterka, J., Trčková, M., Moudrý, J., Zralý, Z., y Herzig, I. 2006. Chemical Composition of the Above-ground Biomass of *Amaranthus cruentus* y *A. hypochondriacus*. *Acta Veterinaria Brno*, 75(1), 133–138.
- Písaříkova B, Peterka J, Trčková M, Moudrý J, zralý Z, Herzig I. 2007. The content of insoluble fibre and crude protein value of the aboveground biomass of *Amaranthus cruentus* y *A. hypochondriacus*. *Czech J. Anim. Sci.*, 52, 2007 (10): 348–353.
- Plate, A., Areas, J. 2002. Cholesterol-lowering effect of extruded amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) in hypercholesterolemic rabbits. *Food Chemistry* 76:1–6.96.
- Pospisil, A., Prospisil, M., Varga, B., Svecnjak, Z. 2006. Grain yield and protein concentration of two amaranth species (*Amaranthus* spp.) as influenced by the nitrogen fertilization. *European J. Agronomy* 25 pp: 250–253.
- Pospisil, A. y M. Pospisil, 2008. Green mass and dry matter yield and nutritional value of forage sorghum and amaranth at different growth stages. *Bulletin Uasvm, Agriculture*, (65 (1): 388–394.
- Pospisil A., Prospisil M., Macesic, D., Svecnajak, Z., 2009. Yield and quality of forage sorghum and different amaranth species (*Amaranthus* spp) biomass. *Agric. Cons. Sci.* 74 (2), 85–89.

- Pourfarid, A., Kamkar, B., y Akbari, G.A. 2014. The effect of density on yield y some agronomical y physiological traits of Amaranth (*Amaranthus* spp). *International Journal of Farming y Allied Sciences IJFAS Journal* 3(12):1256-1259. ISSN 2322-4134.
- Prasad, P. V. V., Satyanarayama, V., Murthy, V. R. K. y Boote, K. J. 2002. Maximizing yields in riceground cropping sequence through integrated nutrient management. *Field Crop Res.*, 75: 9-21.
- PROCISUR, 2010. *El Riego en los países del Cono Sur*. Montevideo, Uruguay. ISBN 978-92-9248-269-5 112p
- Putnam, D. H. 1990. Agronomic practices for grain Amaranth In: *Proceedings of National Amaranth Symposium 4th*, Minneapolis, MN. 23–25 Aug. 1990. Minnesota Ext. Serv. University of Minnesota, St Paul, MN. USA. p. 151–162.
- Putnam, D. H. 2001. Agronomic practices for amaranth, p. 151-162. In: *Proc. 4th*, Minneapolis, MN. 23-25 Aug. Minn. Ext. Serv., Univ. of Minnesota, St Paul.
- Qiang Chai, Yantai Gan, Cai Zhao, Hui-Lian Xu, Reagan M. Waskom, Yining Niu, Kadambot, H. M. Siddique. 2014. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 36: 3.).
- Quiroga, A.; Funaro, D.; Ormeño, O.; Bono, A. y Scianca, C. 2003. Manejo del agua para los cultivos de girasol y maíz en suelos de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. *Cultivos de Cosecha Gruesa. Actualización 2003. Boletín de Divulgación Técnica N° 77.* EEA INTA Anguil. 264 pp.
- Rahman, H. U., Hadley, P., Pearson, S. 2007. Relationship between temperature y cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) growth y development after curd initiation. *Plant Growth Regul.* 52(1):61-72.
- Ramírez, M. E., Carballo Carballo, A., Santacruz Varela, A, Conde Martínez, V., Espitia Rangel, E., y González Cossío, F. 2010. Distinción, homogeneidad y estabilidad mediante caracterización morfológica en variedades de amaranto. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(3), 335-349.
- Ramírez Vazquez, M. L., Espitia Rangel, E., Carballo Carballo, A., Rosalba Zepeda, B., Vaquera Huerta, H. y Córdova Téllez, L. 2011. Fertilización y densidad de plantas en variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) *Rev. Mex. Cienc. Agríc* vol.2 n°.6.

- Rawls, W. J.; Brakensiek, D. L. y Saxton, K. E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 25:1316-1320.
- Rayas Duarte, P., Mock, C. M. y Satterlee, L. D. 1996. Quality of spaghetti containing buckwheat, amaranth y lupin flours. *Cereal Chemistry* 73 (3): 381-387.
- Reekie, E. G. 1998. An explanation for size-dependent reproductive allocation in *Plantago major*. *Can J Bot* 76:43-50
- Reinaudi, N. B; Repollo, R; Janovská D.; Délamo Frier, J.; R; Martín de Troiani, R. 2011. "Evaluación de genotipos de amaranto (*Amaranthus* spp.) para la adaptabilidad productiva en el área de la Facultad de Agronomía" en: *Revista Científica UDO Agrícola* N° 11 (1): 50-57. Universidad Nacional de la Pampa, ciudad, Argentina.
- Reinoso, L. G. 2014. Tesis de Mg cs Ag. Rendimiento de maíz en el Valle Inferior de Rio Negro. Evaluación de la frecuencia de riego y la fertilización nitrogenada.
- Reinoso, L; Martinez, R. S, Margiotta, F, D'Onofrio, M.; Zalba, P. 2010. Rendimiento de maíz y sus componentes frente a cambios en la frecuencia de riego y disponibilidad de nitrógeno en los valles irrigados de la norpatagonia. IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio Nacional de Sorgo. Rosario 2010. 17 al 19 de Noviembre de 2010. En actas del congreso Nacional de Maíz y 1° Simposio Nacional de Sorgo.
- Reinoso, L., Muzi, E., Torretta, J., Martínez, R. S. 2015. Dinámica de extracción de agua del suelo del cultivo de maíz frente a distintas frecuencias de riego gravitacional. XXV Congreso Nacional de Agua CONAGUA. Paraná Entre Ríos. Trabajo extendido. ISBN 978-987-27407-4-0
- Repollo, R., Troiani, R., Nollemeyer, E., Sánchez, T., y Reinaudi, N. 2010. Respuesta del amaranto a dos distancias de siembra y a densidades de población. *Agronomía-Trop.*-60(3):-287-293.-2010.
- Rezaei, J., Y., Rouzbehan, y Fazaeli, H. 2009. Nutritive value of fresh y ensiled amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) treated with different levels of molasses. *Animal Feed Science y Technology*. 151(12):153-160.
- Richards, L.A. 1947. Pressure-membrane apparatus-construction y use. *Agricultural Engineering* 28: 451-454.
- Riveros E. y Cristi A. 1988. Amaranth as a new source for animal feeding. In: *Proc. VI. World Conf. Anim. Prod., WAAP-88 Helsinki*, pp. 352.

- Robertson, K. 1981. The genera of Amaranthaceae in the Southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum* 62: 268-294.
- Robinson, R.G. 1986. Amaranth, quinoa, ragi, tef, y niger: Tiny seeds of ancient history y modern interest. *Stn. Bull. AD-SB-2949. Agric. Exp. Stn., Univ. of Minnesota St. Paul.*
- Rodríguez-Romero N., Araujo-Febres, O., González, B. y Santos, R. 2002 Effect of the Ammoniation with Urea on the pH y Microorganismos of Hay of *Brachiaria humidicola*. *Revista Científica Vol. XII- 2, :572-574,*
- Romero-Zepeda H., Paredes-López O. 1996. Isolation y characterization of amarantin, the 11 amaranth seed globulin. *J. Food Biochem.* 19. Pág. 329-339.
- Rohweder, D.A., Barnes, R.F. and Jorgensen, N. 1978. Proposed Hay Grading Standards Based on Laboratory Analyses for Evaluating Quality. *J. Anim Sci.* 47: 747-759.
- Sadeghi, H. y Bahrani, M.J. 2000. Effect of density y nitrogen fertilizer on protein content y morphology seed corn. *Iran Agronomy J.* 33: 403-412.
- Sadras, V.O. 2006. The N:P stiochiometry of cereal, grain legume y oilseed crops. *Field Crop Res.*, 95: 13-29.
- Sahagún, F. B. 1979. Edición Facsímil del manuscrito 218-220 de la Colección Palatina de la Biblioteca Medicea Laureziana. Códice Florentino. 3 Tomos, Gobierno de la República Mexicana. Sahagún, B. 1576.
- Saini, J.P., Shekhar, J., 1998. Effect of nitrogen fertilizer on growth y yield of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) cultivars under drytemperate. *Indian J. Agron.* 43 (4), 743-746.
- Salisbury, F. B., y Ross, C. 1992. *Plant Physiology*, 4th ed. Wadsworth, Belmont, CA.
- Sánchez, Marroquín. A. 1980. Potencialidad Agroindustrial del Amaranto. Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo. México. 238 p.
- Sánchez Marroquín, A. 1983. Dos cultivos olvidados, de importancia agroindustrial: el amaranto y la quinua. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 33 (1): 11-32.
- Sánchez-Marroquin, A., Domingo, M.V., Maya, S., y Saldaña, C. 1985. Amaranth flour blends y fractions for baking applications. *J. Food Sci.* 50, 789-794.
- Sánchez, E. M., Espitia, R. E. y Osada, K. S. 1991. Etiología de la mancha negra del tallo (*Macrophoma* sp.) en el Amaranto (*Amaranthus* sp.). p. 67. En: Primer Congreso Internacional del Amaranto. Septiembre 22-27. Oaxtepec, Morelos, México.

- Sánchez, A. M., Izquierdo, J., y Jacobsen, S. E. 1993. PRUEBA AMERICANA DE CULTIVARES DE AMARANTO. Reunión Técnica y Taller de Formulación de Proyecto Regional Sobre Producción y Nutrición Humana en Base a Cultivos Yinos, 47.
- Sarmadi, B. Rouzbehan, Y., Rezaei J. 2016. Influences of growth stage y nitrogen fertilizer on chemical composition, phenolics, in situ degradability y in vitro ruminal variables in amaranth forage. *Animal Feed Science y Technology* Volume 215, May 2016, Pages 73–84
- Sauer, J. D. 1950. The grain amaranth: a survey of their history y classification. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 37: 561-616.
- Sauer, J. D. 1967. The grain amaranths y their relatives: a revised taxonomic y geographic survey. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 37: 561-616.
- Sauer, J. D. 1977. The history of grain Amaranth y their use y cultivation around the world. En: *Proceedings of the first Amaranth Seminary*. Rodale Press. Inc. USA.
- Saunders, R. M. y Becker, R. 1984. Amaranthus: a potential food y feed resource. En: Pomeranz, Y. (editor), *Advances in Cereal Science y Technology*, Vol VI. American Association of Cereal Chemists, Inc., St Paul, pág. 357-396.
- Saxton, K. E. y Rawls, W. J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture y Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569–1578.
- Schahbazian, N., Kamkar, B. y Iran Nejad, H. 2006. Evaluation of Amaranth Production Possibility in Arid y Semi Arid Regions of Iran. *Asian Journal of Plant Sciences*, 5: 580-585.
- Seguin, P., Mustafa, A. F., Donnelly, D. J. y Gélinas B. 2013. Chemical composition y ruminal nutrient degradability of fresh y ensiled amaranth forage *journal of the Science of Food y Agriculture* Volume 93, Issue 15, pages 3730–3736.
- Segura Nieto M.; Vázquez Sánchez N.; Rubio Velázquez H.; Olguín Martínez L.; Rodríguez Nester C.; Herrera Estella L. 1992. Characterization of Amaranth (*Amaranthus Hypochondriacus* L.) seed proteins. *J Agric Food Chem.* 40: 1553-1558.
- Segura Nieto, M.; Barba de la Rosa A. P., Paredes López, O. 1994. Biochemistry of amaranth proteins. In *Amaranth: Biology, Chemistry y Technology*; Paredes-López, O., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL; pp 75-106.

- Singh, H. 1961 Grain Amaranth, buckwheat y chenopods. Indian Council of Agricultural Research. Cereal Crops. Series No. 1. New Delhi. pp. 1-21.
- Singh, S., Gupta, A.K., Kaur, N. 2012. Influence of Drought y Sowing Time on Protein Composition, Antinutrients, y Mineral Contents of Wheat. *The Scientific World Journal*.;2012:485751. doi:10.1100/2012/485751.
- Singhal, B. Y. 1984. Inicios de la investigacion en amaranto, como cultivo alimenticio, en el subcontinente Hindu. Washintong D.C.
- Singhal, R. S. y Kulkarni, P. R. 1988. Composition of the seeds of some *Amaranthus* species. *J. Food Sci.* 42: 325-331.
- Sleugh B.B., Moore K.J., Brummer E.C., Allan D.K., Russell J., Gibson L. 2001. Forage nutritive value of various amaranth species at different harvest dates. *Crop Sci.*, 41:466-472.
- Soto, G. 2003. Abonos orgánicos: el proceso de compostaje. In: Gloria Meléndez y Gabriela Soto (eds.) Taller de abonos orgánicos. Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica. San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica. pp 30 – 57.
- Stallknecht, G. F. y Schulz Schaeffer, J. R. 1993. Amaranth rediscovered. En: Janick, J. y J. E. Simon (Eds.). *New Crops*. John Wiley y Sons, Inc. New York. U.S.A.
- Stewart, C. R.; Boggess, S.F. Aspirnll, D. y Paleg, L.C. 1977. Inhibition of proline oxidation by water stress. *Plant Physiol.* 59:930-932.
- Stordahl, J. L., Sheaffer, C. C., DiCostanzo, A. 1999. Variety y maturity affect amaranth forage yield y quality. *Journal of Production Agriculture* 12: 249-253.
- Sumar Kalinowski, L. 1982. *Amaranthuscaudatus* El Pequeño Gigante. (Tercer Congreso Internacional de Cultivos Yinos, La Paz) Universidad Nacional del Cusco, Perú Centro de Investigaciones de Cultivos Yinos, 7 p.
- Sumar Kalinowski,L. 1993. La kiwicha y su cultivo. Centro Bartolomé de las Casas. Cusco, Perú.
- Summerfield, J.R.; Asumadu, H., Ellis, R. H., Qi; A. 1998. Characterization of the Photoperiodic Response of Post-flowering Development in Maturity Isolines of Soyabean (*Glycine max* (L.) Merrill) ‘Clark’ ,*Annals of Botany*, Vol.82, Issue 6, Pages 765–771.
- Svirskis, A. 2003. Investigation of amaranth cultivation y utilization in Lithuania. *Agro. Res.* 1:253-264.

- Taiz, L. y Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology*, 4th Edition publisher: Sinauer Associates, Inc., 2006. ISBN 10: 0878938567 – ISBN 13:9780878938568.
- Tanner, C.B., Sinclair, T.R., 1983. Efficient water use in crop production: research or re-search. In: Taylor, H.M., et al. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, Madison, WI, pp. 1–27.
- Tapia, M., Fries, A.M., Mazar, I., Rosell, C. 2007. *Guía de campo de los cultivos yinos*. FAO-Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú. Lima, PE. 209 p.
- Tavitas, F. L. y Hernández, A. L., 2012. *Manual de la producción química y orgánica del cultivo de amaranto en el estado de Morelos*. Folleto Técnico No. 63. ISBN978-607-425- 812-7.58P.
- Thomison, R. y Nielson, R. L. 2002. Impact of Delayed Planting on Heat Unit Requirements for Seed Maturation in Maize. Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ciencias Vegetales. Seminario Internacional Semillas: comercialización producción y tecnología, Santiago, vol. 15 p. 140–164. <http://seedbiology.osu.edu/PUC/pdf%20files/24-Impact%20delayed%20planting.pdf>
- Thompson, B. 2006. *Foundations of Behavioral Statistics. An Insight-Based Approach*. Guilford Press, New York, 457 Pages.
- Tisdale, S.L. y W.L. Nelson, 1990. Soil fertility y effect of magnesium sources on the yield y chemical composition of crops. Michigan Agricultural experimental station. Bull press,. Michigan, America, pp: 29-31.
- Tisdale, S. L.; W. L. Nelson; J. D. Beaton y J. L. Havlin. 1993. *Soil Fertility yFertilizers*. Quinta Edición Macmillan. New York. 634p. ISBN 0-02-420835-3
- Tokatlidis, I. S., Koutroubas, S.D. 2004. A review of maize hybrids dependence on high plant populations y its implications for crop yield stability. *Field Crops Research* 88:103–114.
- Tongos, M. D. 2016. Yield of Vegetable Amaranth (*Amaranthus Cruentus* L.) as Influenced by Row Spacing y Nitrogen Fertilizer in Mubi, Northern Guinea Savannah Zone of Nigeria. *International Journal of Innovative Agriculture y Biology Research* 4(1):40-48. ISSN: 2354-2934.
- Torres Saldaña G., Trinidad Santos, A., Reyna Trujillo, T., Castillo Juarez, H., Escalante Estrada, A., León González, F. 2006. Respuesta de genotipos de amaranto a densidades de población *Revista Fitotecnia Mexicana*. vol. 29 (04) 307-312. Chapingo, México.

- Transue, D. K., Fairbanks, D. J., Robison, L. R. y Yersen, W. R. 1994. Species Identification by RAPD Analysis of Grain Amaranth Genetic Resources. *Crop Sci.* 34:1385-1389. doi:10.2135/cropsci1994.0011183X003400050044x.
- Trinidad, S. A.; Gómez, L. F. y Suárez, R. G. 1990. El amaranto (*Amaranthus* spp.) su cultivo y aprovechamiento. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. México. 577 p
- Troiani, R.M. y Ferramola, L. 2005. Elaboración y calidad de cubos compactados realizados con biomasa de amaranto Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa. Argentina. *Revista de Desarrollo Rural y Cooperativismo Agrario.* 9: 103-112
- Troiani, R.; Reinaudi N. y Sánchez T. 1989. Calidad nutricional de rebrotes y distintas alturas de *Amaranthus mantegazzianus* Pass. cv. don Juan y *Amaranthus cruentus* L. cv. Don Guien. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición.* Boletín Nro. 4: 16-18.
- Troiani, R., Sánchez, T., y Reinaudi, N. 1998. Una Amarantácea con posibilidades de consumo y cultivo granífero y hortícola *Rev. Fac. Agron. (LUZ).* 1998, 15: 30-37.
- Troiani, R. M., Sánchez, T. M., Reinaudi, N. B. 2004. Optimal sowing dates of three species of grain-bearing amaranth in the semi-arid Argentine Pampa. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2 (3): 385-391.
- Tu, J.C. 1997. An integrated control of white mold (*Sclerotinia sclerotiorum*) of beans, with emphasis on recent advances in biological control. *J. Bot.,* 38: 73-76.
- Turk, K.J. y Hall, A.E. 1980. Drought adaptation of cowpea III. Influence of drought on plant growth y relation with seed yield. *Agronomy Journal,* 72: 428-433.
- U.S. Department of Agriculture. 1979. Vegetables for the hot humid tropics: part 6 Amaranth y Celosia. New Orleans, Agriculture Research, Science y Education Administration. 29 p.
- Valdiviá, M., Alfonso, H.A. y Fraga L.M. 1989. Amaranthus: Un cereal antiguo con posibilidades en la avicultura moderna. *Avicultura Profesional* 6 (4): 140-144.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J.; Ogaya, R., Camarero, J.J., Corcuera, L., Sisó, S., y Gil-Pelegrín, E. 2004. Capítulo 6 Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía en *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante.* Páginas 163-190. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN: 84-8014-552-8
- Van Soest, P. J., 1967. Development of a comprehensive system of feed analysis y its application to forage. *Journal of Animal Science,* 26: 119.

- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., y Lewis, B. A. 1991. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, y Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74 (10): 3583–3597.
- Vargas López, J. L.; Covas, G.; Bailac, F. J. 1993. Comportamiento de ocho cultivares de amaranto granifero (*Amaranthus* spp.) Anguil, Prov. de La Pampa. Campaña 1991/1992. Boletín informativo INTA. Pág. 7.
- Vargas López J. L.; Covas, G. F.; Ruiz, M. A. 2006. Producción de amarantos graníferos: fecha y sistemas de cosecha. Boletín de divulgación técnica. EEA Anguil N°. 94 mar. p. 38-43.
- Venskutonis, P. R. y Kraujalis, P. 2013. Nutritional components of amaranth seeds y vegetables: A Review on composition, properties y uses. *Comprehensive Reviews on Food Science y Food Safety*; Vol. 12 Issue 4: pages 381-412.
- Vieira Queiroz, V. A. V., Santana da Silva, C.; Bezerra de Menezes, C.; Schaffert, R. E.; Mendes Guimaraes, F. F., Guimaraes, L. J. M.; Oliveira Guimaraes, P.E., Dessaune Tardin, F. 2015. Nutritional composition of sorghum [*sorghum bicolor* (L.) Moench] genotypes cultivated without y with water stress. *Journal of Cereal Science* 65 103-111
- Vietmeyer, N.D. 1982. Amaranth: Return of the Aztec Mystery crop. In: *Yearbook of Science in the Future*. Ed. Enciclopedia Britanica. Inc. Chicago, III. pp 189 – 195.
- Wagner, G. P., 1989. The origin of morphological characters y the biological basis of homology. *Evolution* 43:1157-1171. 1989c. The biological homology concept. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 20:51-69.
- Wall, A.D. 1986. The effects of narrow row planting, high crop densities y several post-emergent herbicides on the agronomic qualities of four grain amaranth cultivars. M. S. Thesis. Univ. Of Maryland, College Park
- Walters, R.D., D.L. Coffey y C.E. Sams, 1988. Fiber, nitrate y protein content of *Amaranthus* accessions as affected by soil N application y harvest date. *HortScience*, 23: 338-341.
- Wang, J.Y. 1960. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology* 41: 785-790
- Wang, Shu-Un; Liu, Xin-Hai y LI, JIA-Yi. 1985. Breve informe de una serie de estudios del amaranto de semilla. Beijing Agricultural University Beijing, China. Ed. Arch. Latin. Nutr. USA- Washington, D.C. 3: 7-9.

- Wang, F.X., Xang, Y., Liu, S.P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil water pattern y potato growth in North China Plain. *Agric. Water Manage.* 79:248-264.).
- Webb, D.M., Smith, D.W., Shulz-Schaeffer, J., 1987. Amaranth seedling emergence as affected by seeding depth y temperature on a thermogradient plate. *Agron. J.* 79, 23–26.
- Weber, L.E., Applegate, W.W., Johnson, D.L., Nelson, L.A., Putnam, D.H., Lehman, J.W., 1989. *Amaranth Grain Production Guide*. Rodale Press, Emmaus, PA
- Weiss, W.P. 1994. Pages 644-681 In *Forage Quality, Evaluation, y Utilization*. ASA, CSSA y SSSA, Madison, WI, USA.
- Welham, C. V .J., y Setter, R. A. 1998. Comparison of size-dependent reproductive effort in two dyelion (*Taraxacum officinale*) populations. *Can. J. Bot.* 166- 173.
- Whitehead, W. F., Carter, J., y S. ingh, B. P. 2002. Effect of Planting Date on Vegetable Amaranth Leaf Yield, Plant Height, y Gas Exchange.. *HortScience* 37(5)773-777.
- Williams, J. T., Brenner, D. 1995. Grain amaranth (*Amaranthus* species). In: Williams J.T. (ed.): *Cereals y Pseudocereals*. Chapman y Hall, London: 129–186.
- Wu, H., Sun, M., Yue, S., Sun, H., Cai, Y., Huang, R., Brenner, D., Corke, H. 2000. Field evaluation of an *Amaranthus* genetic resource collection in China. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 47: 43-53.
- Yan, W., Hunt, L. A., 1999. An equation for modelling the temperature-response of plants using only the cardinal temperatures. *Ann. Bot.* 84, 607–614.
- Yarnia, M., Khorshidi Benam, M. B. y Farajzadeh Memari Tabrizi, E. 2010. Sowing dates y density evaluation of amaranth (cv. Koniz) as a new crop . *Journal of Food, Agriculture y Environment* Vol.8 (2): 445-448.
- Yin, X., Kropff, M. J., y Ynalvez M. A. 1997. Photoperiodically Sensitive y Insensitive Phases of Preflowering Development in Rice. *Crop Sci.* 37:182-190.
- Yu, P., Christensen, D. A., McKinnon, J. J., 2004. In situ rumen degradation kinetics of timothy y alfalfa as affected by cultivar y stage of maturity. *Can. J. Anim. Sci.* 84, 255–263.
- Yue, S. y Sun, H. 1993. The rescarch y development of grain amaranth in China.In: *The rescarch y development of grain amaranth in China* (ed. S. Yue). Inst. Of Crop Breeding y Cultivation, Chinese Acad. Agr. Sciences, Beijing. 119.
- Zabka, G. G. 1961. Photoperiodism in *Amaranthus caudatus* Part 1. A re-examination of the photoperiodic response. *Amer. J. Bot.* 48: 21-28.

- Zhang, L.; Wang, R. y. Hesketh J. D. 2001. Effects of photoperiod on growth y development of soybean floral bud in different maturity. *Agron. J.* 93: 944–948.
- Zheleznov, A. V; Zheleznov, A. N. B; Shumny, V. K. 2001. Seed set analysis in three amaranth species (*A. cruentus*, *A. caudatus*, y *A. lividus*) under self- y cross-pollination conditions. *Tsitol Genet.* 35(1):39-4
- Zingaretti, S. M., Marielle Cascaes, I., Matos Pereira, L., Antunes Paz, T. y Suzelei de Castro, F. 2013. Water Stress y Agriculture, Responses of Organisms to Water Stress, Dr. Sener Akinci (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/53877. Available from: <http://www.intechopen.com/books/responses-of-organisms-to-water-stress/water-stress-y-agriculture>

## 11. ANEXO

**Tabla A1.** Determinación de PMP y CC por el laboratorio de la Cátedra de Conservación y Manejo de Suelos del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur

| Muestra  | Cil<br>n° | Dens. Ap.<br>Mg m <sup>-3</sup> | pF 0           | pF 1 | pF 1,5 | pF 1,8 | pF 2,5 | pF 4,2 |
|----------|-----------|---------------------------------|----------------|------|--------|--------|--------|--------|
|          |           |                                 | % gravimétrico |      |        |        |        |        |
| 0-20 M1  | 385       | 1,11                            | 65,5           | 54,6 | 48,2   | 43,4   | 34,4   | 20,8   |
| 0-20 M2  | 318       | 1,08                            | 67,0           | 55,6 | 50,0   | 46,4   | 37,4   | 22,5   |
| 0-20 M3  | 393       | 1,10                            | 64,8           | 53,4 | 47,4   | 42,0   | 35,0   | 21,0   |
| 0-20 M4  | 159       | 1,02                            | 67,4           | 56,3 | 49,5   | 45,6   | 37,6   | 22,0   |
| 0-20 M5  | 122       | 1,03                            | 66,8           | 54,6 | 47,4   | 41,9   | 34,9   | 19,2   |
| 20-40 M1 | 154       | 1,27                            | 49,8           | 47,1 | 45,6   | 43,7   | 36,7   | 21,9   |
| 20-40 M2 | 438       | 1,22                            | 54,0           | 51,6 | 49,1   | 44,6   | 36,6   | 21,4   |
| 20-40 M3 | k         | 1,23                            | 54,0           | 52,2 | 47,6   | 42,9   | 35,9   | 20,5   |
| 20-40 M4 | 236       | 1,22                            | 52,7           | 49,3 | 45,8   | 42,0   | 34,0   | 19,9   |
| 20-40 M5 | 275       | 1,28                            | 52,0           | 48,6 | 45,9   | 41,0   | 32,0   | 19,6   |

pF 1,8 = Capacidad de Campo pF 1,8 = Capacidad de Campo

pF 4,2 = Punto de Marchitez Permanente pF 4,2 0 Punto de Marchitez Permanente

| Profund.  | 0 - 20 | 20 - 40 |
|-----------|--------|---------|
|           | 43,4   | 43,7    |
|           | 46,4   | 44,6    |
|           | 42,0   | 42,9    |
|           | 45,6   | 42,0    |
| Prom. 1,8 | 44,3   | 43,3    |
|           | 20,8   | 22,8    |
|           | 22,5   | 22,2    |
|           | 21,0   | 22,4    |
|           | 22,0   | 22,6    |
| Prom. 4,2 | 21,6   | 22,5    |

The pF-Meter's measurement parameter (and our function's input parameter) is the pF-value. It is defined as logarithm of the absolute value of soil matric potential [Lal and Shukla 2004]:

$$pF = \log |\psi_m|,$$

where  $\psi_m$  is the Matric potential in [cm].

Note that here Matric potential is expressed as energy per unit weight in terms of height of water in [cm].

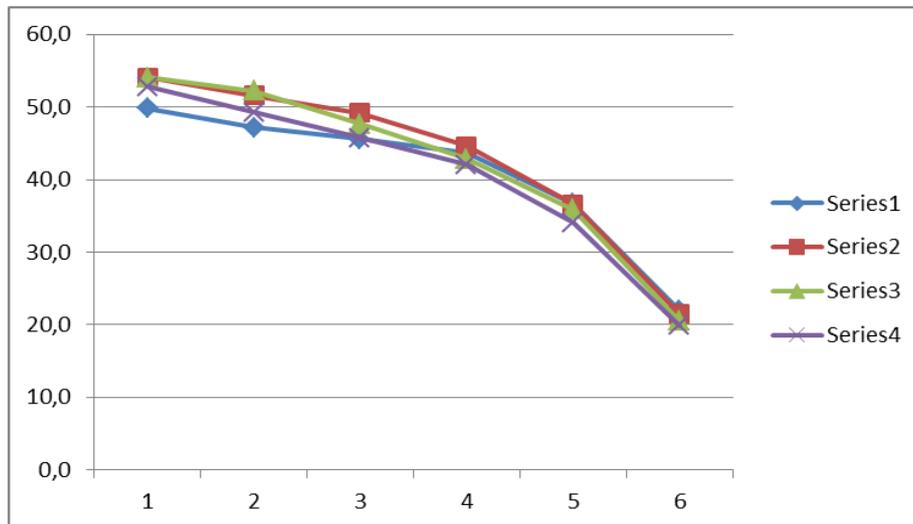
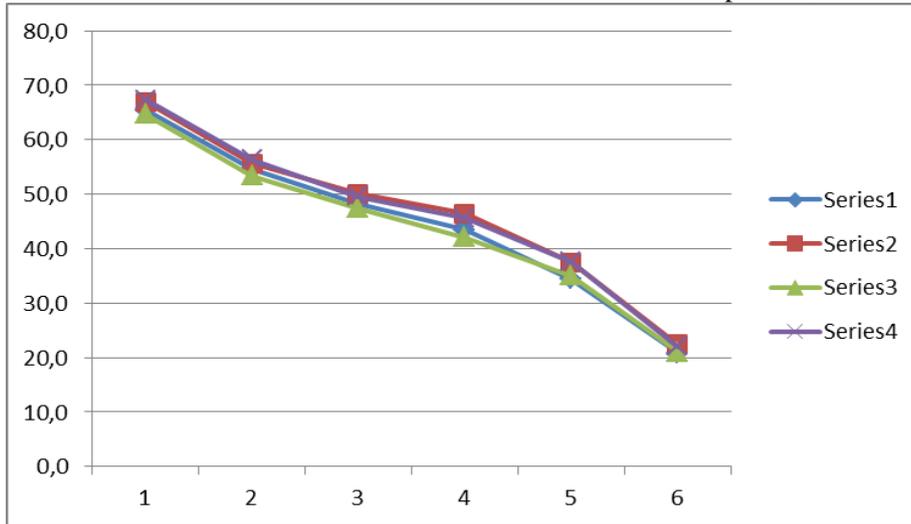
It may also be expressed as energy per unit volume in [hPa] (1 cm = 0.981 hPa)

Lal and Shukla 2004] R. Lal and A. Shukla. Principles of Soil Physics.

Books in Soils, Plants, and the Environment

Series.

Marcel Dekker Incorporated, 2004.



**Tabla A.2.** Rendimientos promedios según fecha de siembra, año de cultivo y genotipo.

| F. siembra | 2010-2011   |           |             | 2011-2012   |           |             | 2012-2013   |           |             |
|------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-----------|-------------|
|            | A. cruentus | A. Dorado | A. Antorcha | A. cruentus | A. Dorado | A. Antorcha | A. cruentus | A. Dorado | A. Antorcha |
| 1° fecha   | 4264        | 4465      | 3930,67     | 3650,63     | 2717,63   | 3425,67     | 3632,14     | 1069,09   | 3049,05     |
| 2° fecha   | 5285        | 4622,36   | 4809,87     | 4323,33     | 2717,76   | 3571,06     | 3582,48     | 1021,24   | 3075,9      |
| 3° fecha   | 5085,33     | 4260,33   | 4392,33     | 4066,62     | 2879,37   | 3232,03     | 3219,51     | 803,33    | 2981,77     |
| 4° fecha   | 2055,4      | 2012,27   | 2005,83     | 1011,84     | 720,55    | 1011,64     | 321,76      | 94,35     | 293,2       |

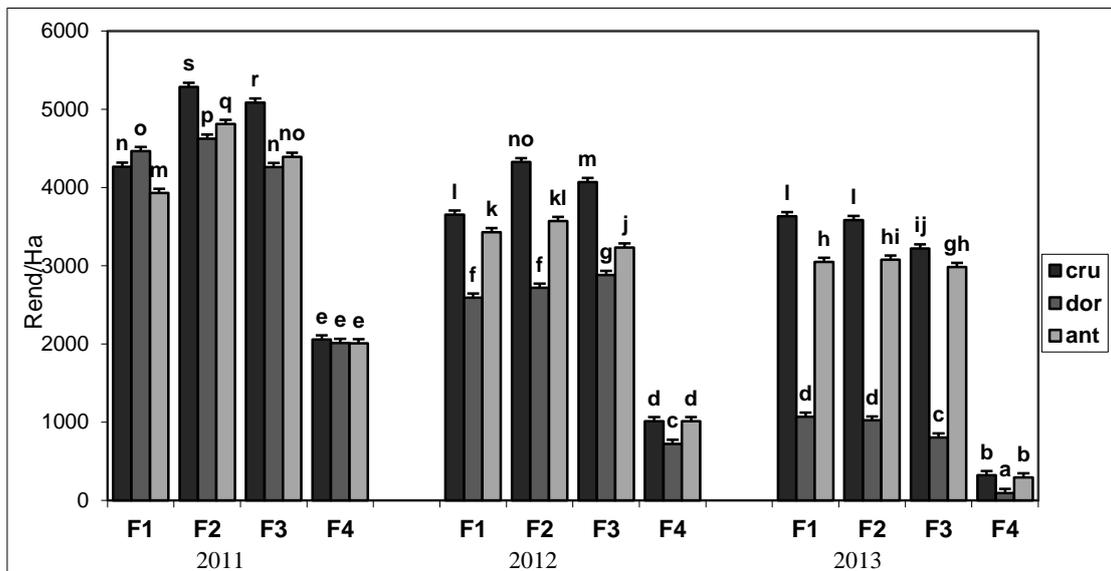
**ES(c/med) = 40,04110338**

**Tabla A.3.** Análisis de ANOVA de la variable rendimiento (Re) para 3 genotipos, 4 fechas de siembra y 3 años de ensayo.

| Fuente de Var      | SC          | gl  | CM         | F       | p             |
|--------------------|-------------|-----|------------|---------|---------------|
| <b>Años</b>        | 72911249,45 | 2   | 36455624,7 | 9004,60 | <b>0,0000</b> |
| <b>bloq / Años</b> | 24291,32935 | 6   | 4048,55489 |         |               |
| <b>Fechas</b>      | 120424493,4 | 3   | 40141497,8 | 6907,28 | <b>0,0000</b> |
| <b>A x F</b>       | 1686738,115 | 6   | 281123,019 | 48,37   | <b>0,0000</b> |
| <b>error 1</b>     | 104606,5325 | 18  | 5811,47403 |         |               |
| <b>Genotipo</b>    | 22522955,96 | 2   | 11261478   | 1353,31 | <b>0,0000</b> |
| <b>A x G</b>       | 10828952,84 | 4   | 2707238,21 | 325,33  | <b>0,0000</b> |
| <b>F x G</b>       | 5646524,188 | 6   | 941087,365 | 113,09  | <b>0,0000</b> |
| <b>A x F x G</b>   | 4063636,517 | 12  | 338636,376 | 40,69   | <b>0,0000</b> |
| <b>error 2</b>     | 399428,6726 | 48  | 8321,43068 |         |               |
| <b>Total</b>       | 238612877   | 107 |            |         |               |

|                    |            |
|--------------------|------------|
| <b>ES(c/med) =</b> | 52,6669747 |
|--------------------|------------|

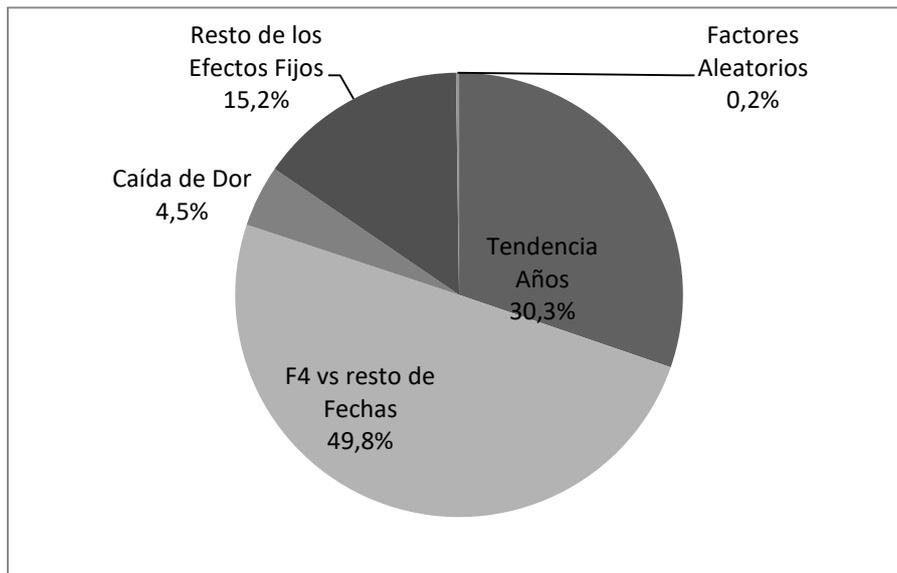
**Figura A.1.** Análisis de ANOVA de la variable rendimiento para 3 genotipos, 4 fechas de siembra y 3 años de ensayo.



**Tabla A. 4.** Análisis de ANOVA con contraste de F4 vs (F3+F2+F1) para la variable rendimiento (Re) con 3 genotipos y 3 años de ensayo

| Fuente de Var             | %            | % rel        | SC        | gl | CM       | F       | p             |
|---------------------------|--------------|--------------|-----------|----|----------|---------|---------------|
| Años                      | 30,56        |              | 72911249  | 2  | 36455625 | 9004,60 | <b>0,0000</b> |
| bloq / Años               | 0,01         |              | 24291,329 | 6  | 4048,555 |         |               |
| <b>Fechas</b>             | <b>50,47</b> |              | 12042449  | 3  | 40141498 | 6907,28 | <b>0,0000</b> |
| <b>F4 vs (F1+F2+F3)/3</b> |              | <b>98,74</b> | 11890461  | 2  | 11890461 | 20460,3 | <b>0,0000</b> |
| A x F                     | 0,71         |              | 1686738,1 | 6  | 281123   | 48,37   | <b>0,0000</b> |
| error 1                   | 0,04         |              | 104606,53 | 18 | 5811,474 |         |               |
| Genotipo                  | 9,44         |              | 22522956  | 2  | 11261478 | 1353,31 | 0,0000        |
| A x G                     | 4,54         |              | 10828953  | 4  | 2707238  | 325,33  | 0,0000        |
| F x G                     | 2,37         |              | 5646524,2 | 6  | 941087,4 | 113,09  | <b>0,0000</b> |
| A x F x G                 | 1,70         |              | 4063636,5 | 12 | 338636,4 | 40,69   | <b>0,0000</b> |
| error 2                   | 0,17         |              | 399428,67 | 48 | 8321,431 |         |               |
| Total                     | 100          |              | 23861287  | 7  | 107      |         |               |

**Figura A.2.** Porcentajes de fuente de variación del análisis de ANOVA con contrastes realizado para 4 fechas, 3 genotipos y 3 años.



**Tabla A.5.** Análisis de ANOVA con contraste de Dorado vs (Cruentus + Antorcha) para la variable rendimiento (Re) 3 fechas y 3 años de ensayo.

| Fuente de Var                | %               | % rel          | SC       | gl     | CM       | F        | p               |
|------------------------------|-----------------|----------------|----------|--------|----------|----------|-----------------|
| Años                         | 55,03431        |                | 56186677 | 2      | 28093339 | 1772,147 | <b>4,83E-09</b> |
| bloq / Años                  | 0,093165        |                | 95116,27 | 6      | 15852,71 |          |                 |
| Fechas                       | 1,671633        |                | 1706636  | 2      | 853317,9 | 30,36144 | <b>2,02E-05</b> |
| A x F                        | 1,215167        |                | 1240612  | 4      | 310153   | 11,03538 | <b>0,000545</b> |
| error 1                      | 0,330347        |                | 337263,9 | 1<br>2 | 28105,32 |          |                 |
| Genotipo                     | 25,98504        |                | 26529138 | 2      | 13264569 | 542,8655 | <b>1,3E-27</b>  |
| A x G                        | <b>12,76568</b> |                | 13032986 | 4      | 3258247  | 133,3469 | <b>4,66E-21</b> |
| <b>Caída de Dor vs resto</b> |                 | <b>92,2842</b> | 12027387 | 1      | 12027387 | 492,2327 | <b>7,87E-12</b> |
| F x G                        | 0,754263        |                | 770056,4 | 4      | 192514,1 | 7,878829 | <b>0,000114</b> |
| A x F x G                    | 1,288797        |                | 1315783  | 8      | 164472,9 | 6,731214 | <b>2,26E-05</b> |
| error 2                      | 0,861596        |                | 879636,8 | 3<br>6 | 24434,35 |          |                 |
| Total                        | 100             |                | 1,02E+08 | 8<br>0 |          |          |                 |

**Tabla A.6.** Análisis de ANOVA de la variable rendimiento (Re) para 2 genotipos, 3 fechas de siembra y 3 años de ensayo.

| Fuente de Var | SC          | gl | CM         | F       | p             |
|---------------|-------------|----|------------|---------|---------------|
| Años          | 17559006,18 | 2  | 8779503,09 | 1944,07 | <b>0,0000</b> |
| bloq / Años   | 27096,25606 | 6  | 4516,04268 |         |               |
| Fechas        | 1851558,51  | 2  | 925779,255 | 81,16   | <b>0,0000</b> |
| A x F         | 1724923,11  | 4  | 431230,777 | 37,80   | <b>0,0000</b> |
| error 1       | 136886,0174 | 12 | 11407,1681 |         |               |
| Genotipo      | 3589919,501 | 1  | 3589919,5  | 272,28  | <b>0,0000</b> |
| A x G         | 60195,87143 | 2  | 30097,9357 | 2,28    | <b>0,1307</b> |
| F x G         | 123644,984  | 2  | 61822,492  | 4,69    | <b>0,0230</b> |
| A x F x G     | 401725,3895 | 4  | 100431,347 | 7,62    | <b>0,0009</b> |
| error 2       | 237320,4804 | 18 | 13184,4711 |         |               |
| Total         | 25712276,3  | 53 |            |         |               |

|           |           |
|-----------|-----------|
| ES(c/med) |           |
| =         | 66,293467 |

**Figura A.3.** Pantas de *Amaranthus hypochondriacus* cv Dorado ciclo productivo 2010-2011 obtenidas a partir de semilla proveniente de Río Cuarto, Córdoba con polinización abierta.



**Figura A.4.** Pantas de *Amaranthus hypochondriacus* cv Dorado ciclo productivo 2011-2012 obtenidas a partir de semilla de plantas autopolinizadas en el Valle Inferior de Rio Negro.



**Figura A.5.** Pantas de *Amaranthus hypochondriacus* cv Dorado ciclo productivo 2012-2013 obtenidas a partir de semilla de plantas autopolinizadas en el Valle Inferior de Rio Negro.



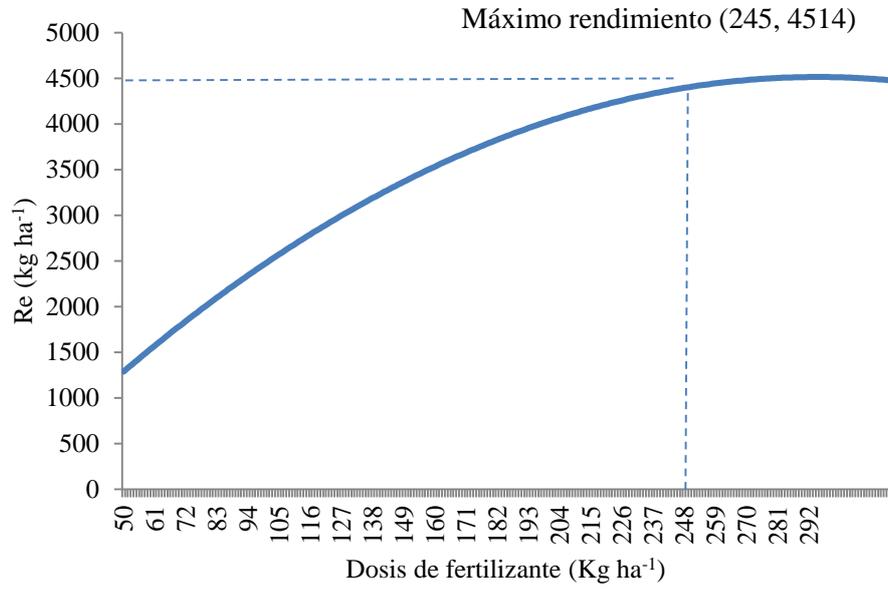
### Relación insumo- producto

Una función de producción es la relación existente entre la cantidad de factores que se utilizan por unidad de tiempo y el volumen de producción obtenido. Al agregar unidades sucesivas de un factor variable a un conjunto de factores fijos la producción física total primero aumenta de manera creciente, al continuar con el agregado de unidades de factor variable sigue su crecimiento pero a una tasa decreciente, alcanza el máximo y luego comienza a disminuir (Aguilar *et al.*, 1997).

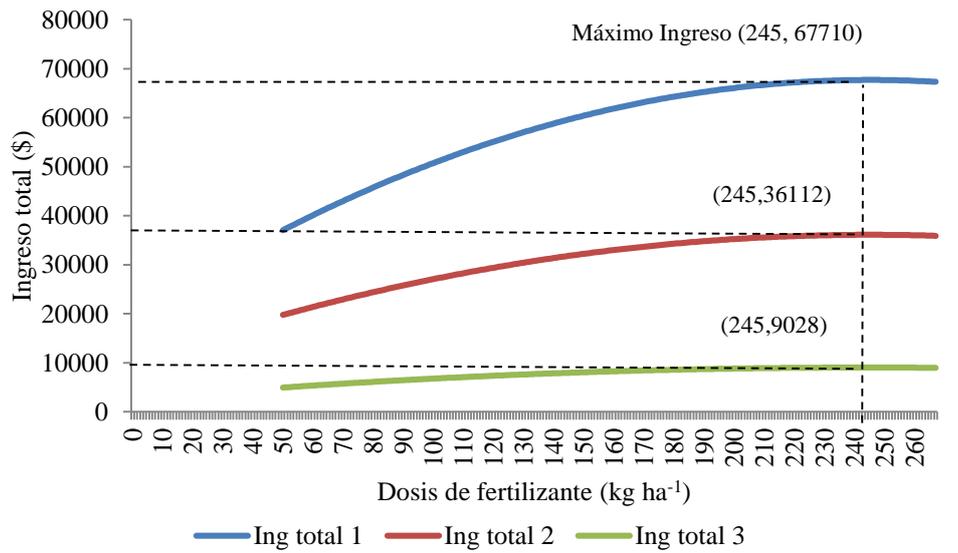
El principio de los rendimientos decrecientes se centra en lo mencionado anteriormente “el agregado de unidades sucesivas de un factor variable a un conjunto de factores fijos, los aumentos en la producción comienzan a disminuir a partir de cierto punto”. Es decir cuanto mayor sea la cantidad de factor variable utilizada menor será el incremento del producto por unidad adicional de factor. Es importante destacar que el factor variable (fertilizante) debe agregarse hasta el punto en que los rendimientos decrecientes (pesos de amaranto) se igualen al costo marginal (pesos del fertilizante) el punto donde el producto marginal (PMg: incremento del producto total debido a una unidad adicional de insumo) se vuelve cero es la máxima cantidad en que es beneficioso aplicar el factor variable en combinación con los restantes factores fijos (Aguilar *et al.*, 1997).

Otro punto importante es conocer el precio unitario del insumo variable y del producto. Al multiplicar el valor unitario del producto por el total producido obtenemos el valor del producto total. En el punto donde el precio unitario del insumo variable (línea constante Figura A.9) iguala al IMg nos encontramos en el nivel óptimo de uso del insumo y donde se obtienen las mayores ganancias (Bernard y Nix; 1984; Aguilar *et al.*, 1997)

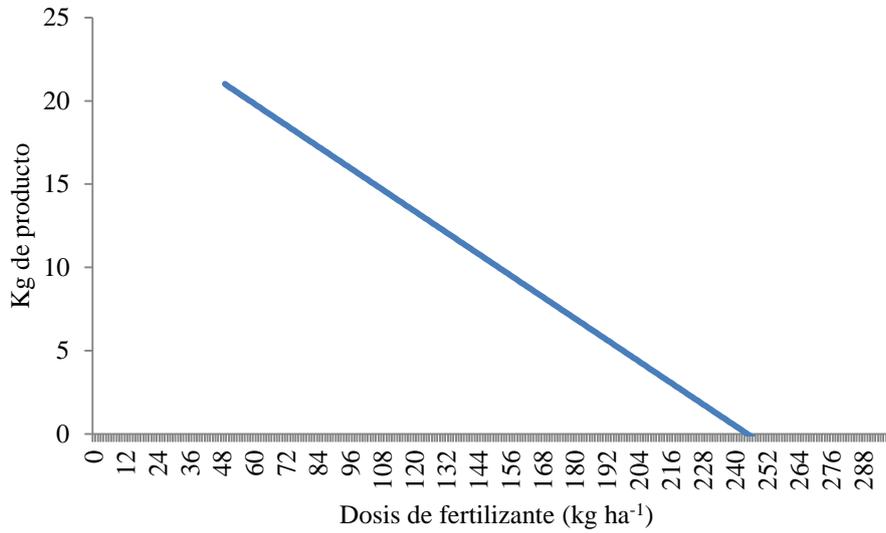
**Figura A.6.:** Relación insumo producto para las condiciones del ensayo



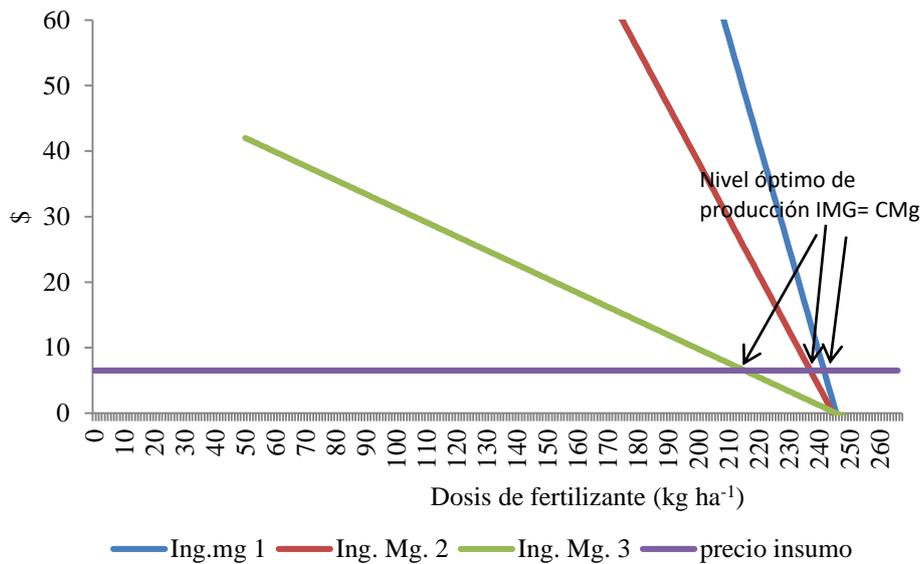
**Figura A.7.** Ingresos percibidos para diferentes precios unitarios del producto (línea azul \$15, línea roja \$8 y línea verde \$2)



**Figura A.8.** Producto marginal (PMg) en función de las dosis de fertilizante utilizadas para las condiciones de ensayo.



**Figura A.9.** Nivel óptimo de producción según los diferentes precios unitarios de producto (línea azul \$15, línea roja \$8 y línea verde \$2)



**Figura A.10.** Imágenes ilustrativas del comportamiento del cultivo de *Amaranthus cruentus* cv Mexicano durante los ciclos productivos 2010-2011 y 2011-2012 sin aplicación de riego.



**Figura A.11.** Emergencia de plantulas de amaranto con aplicación de riego.



**Figura A.12.** Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.



**Figura A.13.** Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.



**Figura A.14.** Parcelas experimentales cultivadas sin aplicación de riego donde se observa una evidente pérdida de plantas por efecto del estrés hídrico.

