



UNIVERSIDAD DE CHILE

Serie Ciencias Agronómicas
N° 38, 2024

Amaranto: Principios y experiencias para su cultivo en Chile



Cecilia Baginsky G.
Paola Silva C.
Marco Garrido S.



FACULTAD DE CIENCIAS
AGRONÓMICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

C. Baginsky G., P. Silva C. y M. Garrido S.

Amaranto: Principios y experiencias para su cultivo en Chile

Santiago, Universidad de Chile

Facultad de Ciencias Agronómicas, 2024

Serie Ciencias Agronómicas N°

72 páginas

La presente publicación entrega resultados obtenidos en el marco del proyecto **“Amaranto: una alternativa productiva, nutritiva y resiliente al cambio climático para la pequeña agricultura de la Zona Central de Chile” (FIA, PYT- 2018-0026)** desarrollado por la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, entre los años 2018 y 2022, con el apoyo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) del Ministerio de Agricultura. Incluye también resultados de la iniciativa “Fomento al cultivo y consumo de amaranto: Potenciación Chile – México” financiado por la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID)

Comité Editor:

Ricardo Pertuzé

Oscar Seguel

ISBN Serie: 978-956-19-0363-0

ISBN Libro: 978-956-19-1314-1

R.P.I.: 2024-A-1402

Facultad de Ciencias Agronómicas

Departamento de Producción Agrícola

Universidad de Chile

Santa Rosa 11.315, La Pintana, Santiago

e-mail: cbaginsk@uchile.cl; psilva@uchile.cl; marcogarrido@uchile.cl

Fundación para la Innovación Agraria (FIA)

Supervisión Técnica: Paulina Erdmann Fuentes

Diseño y Diagramación: Belén Morales S.

Autores

Dra. Cecilia Baginsky Guerrero.

Ingeniera Agrónoma, Dra. Ciencias Agrícolas. Académica de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, especialista en cultivos de leguminosas de grano y cultivos ancestrales.

Dra. Paola Silva Candia.

Ingeniera Agrónoma, Dra. en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias. Académica de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, especialista en sustentabilidad agrícola en ambientes de secano mediterráneo.

Dr. Marco Garrido Salinas.

Ingeniero Agrónomo, Dr. en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias. Académico de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Especialista en ecofisiología de plantas.

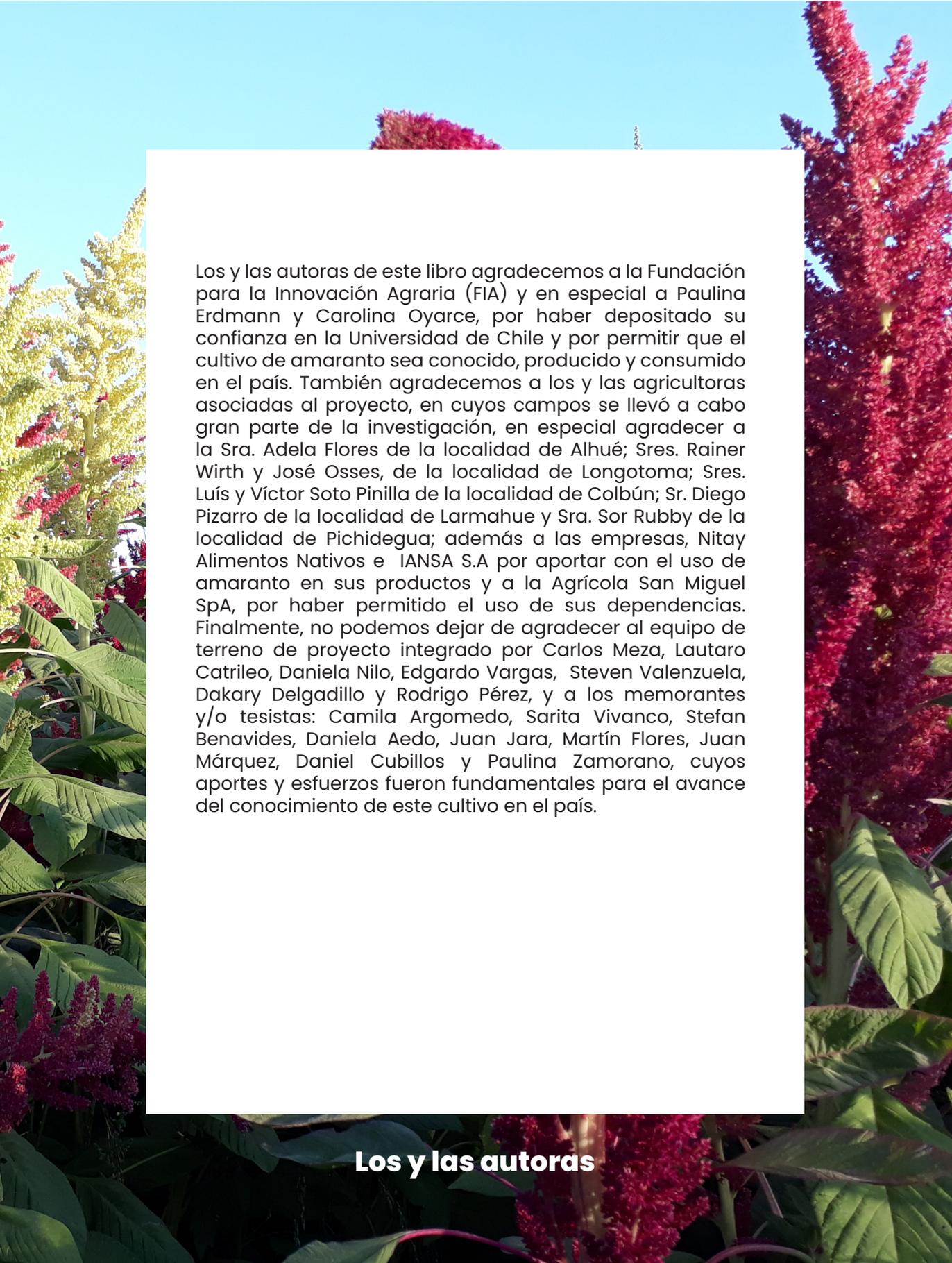
The background of the page is a vibrant photograph of amaranth plants. On the left, there are tall stalks with bright red, feathery flower heads. On the right, a plant has a large, bright yellow flower head. The leaves are green and broad. The sky is a clear, light blue.

Presentación y Agradecimientos

Este es un libro que se ha desarrollado al alero del proyecto **“Amaranto: una alternativa productiva, nutritiva y resiliente al cambio climático para la pequeña agricultura de la Zona Central de Chile”** financiado por la Fundación para la Innovación Agraria, a través de la convocaría FIA, PYT-2018-0026. El objetivo principal de este proyecto fue seleccionar variedades de amaranto, resilientes al estrés hídrico. Para esto se consideró la productividad de amaranto, la calidad nutricional y funcional de los granos, y su eficiencia en el uso del agua en la zona Central de Chile.

Los resultados emanados a partir de este proyecto permiten contar con información relevante respecto del cultivo de amaranto, su fisiología, morfología, fenología, crecimiento y manejo. Con ello, se podrán elaborar herramientas con base científica y técnica para el manejo agrómico del cultivo en Chile. Esto hace viable su introducción como una nueva alternativa de producción para los campos chilenos, sobre todo en un contexto de cambio climático. Asociado a ello, se contará con un nuevo alimento cuyas ventajas nutricionales pueden aportar a la reducción de la mal nutrición en Chile y a una alimentación más sostenible.

El sello especial que tiene el libro “Amaranto: Principios y experiencias para su cultivo en Chile” es que en él convergen experiencias e información científica y técnica, tanto de estudios internacionales como nacionales hechos en la zona Central de Chile durante cuatro años, a través de un equipo multidisciplinario de investigadoras e investigadores de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.



Los y las autoras de este libro agradecemos a la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y en especial a Paulina Erdmann y Carolina Oyarce, por haber depositado su confianza en la Universidad de Chile y por permitir que el cultivo de amaranto sea conocido, producido y consumido en el país. También agradecemos a los y las agricultoras asociadas al proyecto, en cuyos campos se llevó a cabo gran parte de la investigación, en especial agradecer a la Sra. Adela Flores de la localidad de Alhué; Sres. Rainer Wirth y José Osses, de la localidad de Longotoma; Sres. Luís y Víctor Soto Pinilla de la localidad de Colbún; Sr. Diego Pizarro de la localidad de Larmahue y Sra. Sor Rubby de la localidad de Pichidegua; además a las empresas, Nitay Alimentos Nativos e IANSA S.A por aportar con el uso de amaranto en sus productos y a la Agrícola San Miguel SpA, por haber permitido el uso de sus dependencias. Finalmente, no podemos dejar de agradecer al equipo de terreno de proyecto integrado por Carlos Meza, Lautaro Catrileo, Daniela Nilo, Edgardo Vargas, Steven Valenzuela, Dakary Delgadillo y Rodrigo Pérez, y a los memorantes y/o tesisistas: Camila Argomedo, Sarita Vivanco, Stefan Benavides, Daniela Aedo, Juan Jara, Martín Flores, Juan Márquez, Daniel Cubillos y Paulina Zamorano, cuyos aportes y esfuerzos fueron fundamentales para el avance del conocimiento de este cultivo en el país.

Los y las autoras

Prólogo

“No habrá justicia social global sin justicia cognitiva global.”
(Boaventura de Sousa Santos)

Las evidencias de los restos botánicos arqueológicos más antiguos de especies de amaranto en el Continente Americano lo sitúan desde por lo menos hace 9.000 años. Un largo período que evidencia la capacidad humana, para generar conocimiento y reconocer la importancia de esta planta y sus propiedades alimenticias, e incluirla junto con otras, como la calabaza, el maíz y el frejol, en sus actividades de recolección, cultivo y domesticación. Es así que, de la amplia diversidad de especies del género *Amaranthus*, cuatro de ellas estuvieron presentes en las culturas originarias del Continente Americano, la cultura Mesoamericana y la del Área Andina.

Aunque no se tiene conocimiento exacto del proceso para pasar de la recolección, al cultivo y la domesticación, tampoco se tienen evidencias de que las técnicas de producción hayan sido de interés específico para su sistematización escrita en estas dos culturas originarias. Los registros prehispánicos sobre aspectos de manejo y de aquellos elaborados en la conquista y hasta el siglo XVIII, fueron a partir de referencias sobre temas culturales, religiosos, históricos y políticos.

Por otro lado, no se tienen evidencias claras de una prohibición jurídica de su cultivo en la época de la conquista. Hay cierto consenso en que, dada la similitud de algunas ceremonias religiosas con la comunión cristiana, en donde los pobladores nativos incluían al amaranto, pudo haberse generado una especie de censura, relegando su uso y confinándose a lugares remotos o de difícil acceso y, con ello, limitar la aplicación y socialización de las técnicas productivas, incluso hasta la pérdida del conocimiento local asociado.

Actualmente, hay un reconocimiento histórico, empírico y científico de las características y propiedades nutricionales del amaranto y de su capacidad para reforzar los sistemas agroalimentarios del mundo. Para detonar esta capacidad y posibilidad alimentaria, son necesarias políticas públicas que allanen el camino y permitan diseñar estrategias para su difusión y su integración como sistema de producción relevante. Esto, a su vez, demandará disponer de información técnica y tecnológica que permita cubrir las necesidades de manejo del cultivo. Por tal razón, es necesario impulsar procesos de investigación, desarrollo e innovación de carácter local en las regiones y territorios para que pueda estar disponible para los interesados en su cultivo.

Este manual responde a lo anterior, siendo una aportación significativa que atiende aspectos básicos para la producción de amaranto en la zona central de Chile. Parte de la información es de carácter general, y puede hacerse extensiva a otras regiones del país donde se tenga condiciones para cultivarlo. Es una aportación valiosa, porque se escribe a partir de resultados de investigación, experimentación rigurosa y de experiencias relevantes de campo conjuntamente con agricultores.

Este libro relativo al amaranto aporta información y conocimiento sobre aspectos de manejo de un cultivo con amplia capacidad alimentaria que traspasa las fronteras de Chile, dado que la información técnica y metodológica que presenta se puede hacer extensiva a otros ámbitos de Latinoamérica. Por ello, en la Red Latinoamericana del Amaranto (Red LAAM), integrada por naciones como Perú, Ecuador, Argentina, Chile, Bolivia, Guatemala y México, vemos con beneplácito la concreción de este documento. Sabemos que será de gran valor como referente técnico y metodológico para quienes estén inmersos en su estudio o pretenden incursionar en este.

No quiero terminar sin antes extender una felicitación a todos aquellos, quienes, desde la investigación y pruebas de campo, colaboraron en generar esta relevante información y a los autores, por el esfuerzo realizado y hacer posible la publicación de este libro, mismo que se suma al impulso de otros actores en el continente, para promover un cultivo con un futuro promisorio, que nos ha sido heredado por nuestros antepasados y que es necesario retomarlo para situarlo en el lugar que le corresponde.



**Adrián Argumedo
Macías**

Presidente de la Red
Latinoamericana del
Amaranto
(Red LAAM)



Índice

1.	Introducción	2
2.	Especies y variedades de amaranto	4
3.	Morfología y fenología del amaranto	6
	Morfología	7
	Fases fenológicas	11
4.	Ecofisiología del amaranto	16
	Fisiología	17
	Crecimiento	18
5.	Adaptación de variedades de amaranto en la zona central de Chile	22
6.	Requerimiento hídrico y estrés salino del cultivo del amaranto	30
	Eficiencia del uso del agua y tolerancia al déficit hídrico	32
	Experiencias en Chile: Riego deficitario	35
	Estrés salino en amaranto	37
	Experiencias en Chile: Estrés salino	38
7.	Fecha de siembra en amaranto	40
	Requerimientos climáticos	41
	Experiencias en Chile: Fecha de siembra	43
8.	Densidad de plantas en amaranto	46
	Densidad de plantas y su efecto en el crecimiento y rendimiento	47
	Experiencias en Chile: Densidad de plantas	49
9.	Fertilización en amaranto	52
	Beneficios de la aplicación de enmiendas orgánicas	56
	Experiencias en Chile: Fertilización	57
10.	Referencias	60



1. Introducción

Chile se encuentra entre los diez países más afectados por el cambio climático, el cual está repercutiendo fuertemente en la disponibilidad de agua para los cultivos y, por tanto, en su producción y rentabilidad. El 72% de la superficie en Chile sufre de sequía en algún grado; de un total de 345 comunas a nivel país, 156 presentan riesgo de desertificación, amenaza que podría afectar a más de 6 millones de habitantes en el país. Desde el año 2009, la zona central, desde la región de Valparaíso al Maule, ha tenido sequías prolongadas con un déficit de precipitaciones anuales cercanas a 70% y con una pérdida de superficie cultivable importante, afectando principalmente a especies de primavera-verano tales como maíz, remolacha, poroto y papa, que han reducido su superficie en un 70%, 63%, 48% y 25%, respectivamente^{1,2}.

Bajo este escenario, la agricultura familiar campesina ha sido uno de los sectores más vulnerables, cuyas incertidumbres se relacionan, entre otras, con los riesgos en la generación de ingresos familiares, la contaminación de suelos y aguas, producción y mercado y, canales de comercialización². Esta situación compromete la producción de alimentos saludables y lleva a determinados sectores poblacionales a un estado de inseguridad alimentaria.

Frente a este problema, se han propuesto diversas medidas y recomendaciones a nivel predial, entre ellas: el uso y/o cambio de especies y/o variedades con alta eficiencia en el uso del agua. En ese contexto, el amaranto surge como una alternativa viable para los y las agricultoras de la zona central de Chile, dado que su metabolismo fotosintético C_4 le confiere una mayor eficiencia del uso del agua, siendo esta superior a la mayoría de los cultivos; además, su alta plasticidad ante condiciones ambientales adversas como el estrés hídrico, salino, las altas temperaturas o la escasa fertilidad, lo hace un cultivo de gran interés.

El presente libro incorpora antecedentes generales respecto de la fisiología del amaranto, morfología, crecimiento y desarrollo, que permiten entender esta capacidad del cultivo de crecer bajo condiciones ambientales con algún grado de estrés. A su vez, se entregan antecedentes sobre los requerimientos climáticos (temperatura, largo del día), hídricos y nutricionales que permiten entender su manejo en lo que respecta a la fecha de siembra, manejo del riego y de la fertilización. Estos aspectos luego son abordados a través de experiencias llevadas a cabo en la zona Central del país, desde la región de Valparaíso hasta la región del Maule, donde se entregan los principales resultados y recomendaciones respecto del uso de variedades, sus fechas de siembra en función de optimizar el rendimiento, así como los requerimientos hídricos, densidad de plantas y fertilización.

Este es el primer libro que incorpora experiencias nacionales de manejo del amaranto, y se espera que los agricultores/as se maravillen con sus ventajas agronómicas, masificando su producción en el país, llenando con bellos colores los campos de la zona central.



2. Especies y variedades de amaranto

Dra. Cecilia Baginsky G.

Dra. Hirán Morán B.

Dr. Sergio Barrales D.

El **amaranto**, que significa **“inmortal o que no se marchita”**, es nativo de América y fue un cultivo importante para las civilizaciones Precolombinas, constituyéndose como uno de los principales cultivos sembrados por los Mayas, desde hace 5.000 a 7.000 años, de quienes otros pueblos de América, entre ellos los Aztecas y los Incas aprendieron su consumo, antes de que las civilizaciones sudamericanas fueran irrumpidas por los españoles³.

Las plantas de este cultivo pertenecen a la familia Amaranthaceae, género *Amaranthus* e incluye más de 70 especies, donde 40 de ellas son nativas de América y 17 son comestibles⁴. Estas especies tienen distintos centros de domesticación y de origen, estando ampliamente distribuidas en América del Norte (Canadá y EE. UU.), América Central (México y Guatemala) y América del Sur (Perú, Bolivia y Ecuador), donde se ha encontrado una gran variabilidad genética en cuanto a aspectos morfológicos y adaptativos en función del clima, temperatura, largo del día, disponibilidad hídrica, entre otros⁵. Debido a esto, cuenta con una amplia adaptabilidad geográfica en diversas condiciones medioambientales⁶.

Entre las especies de mayor importancia para la producción de granos, se encuentran *A. cruentus* L. (amaranto púrpura) procedente del norte de México y Centroamérica, *A. hypochondriacus* L. (pluma de príncipe) desde el suroeste de Estados Unidos a México y *A. caudatus* L. (trigo inca, amor-mentira-sangrado), de la región andina del norte de Bolivia, Perú y Ecuador^{7,8,9}.

En Chile y gracias a estudios arqueológicos llevados a cabo en la zona norte del país, se logró identificar la presencia de amaranto en ciertas aldeas de la Pampa del Tamarugal, correspondiente a la Región de Tarapacá. Los restos vegetales fueron recuperados de excavaciones hechas en un sitio denominado Caserones. Estos restos documentan dimensiones básicas de la vida social, principalmente alimentación, artesanía y construcción de los pobladores de la zona. Por una parte, la diversidad de alimentos presentes en ese sitio (amaranto, quinua, porotos, pallares, algarrobo, maíz, calabaza, entre otros), fue importante en tres tipos de espacios, que incluyen contextos de preparación y consumo de alimentos, pozos de almacenaje y contextos ceremoniales. Estas evidencias conformarían los contextos agrícolas más tempranos de la Pampa del Tamarugal, especialmente fechados entre 160 AC y 70 DC. Se cree que estos cultivos debieron ingresar a la región ya domesticados, lo cual no implica que no haya existido un proceso de experimentación local para adecuar dichas especies a los suelos locales¹⁰.



3. Morfología y fenología del amaranto

**Dra. Cecilia Baginsky G.
Dra. Hirán Morán B.
Dr. Sergio Barrales D.**

Morfología

El amaranto es una planta dicotiledónea anual, perteneciente a la familia Amaranthaceae, de crecimiento rápido, herbácea y con tallos largos que pueden alcanzar una altura de hasta los 3 m.

Las plantas son, en general, matizadas con un pigmento rojizo llamado betacianinas, que se manifiesta desde las primeras etapas de crecimiento de las plántulas y poco después de la germinación⁴.

La mayor parte de las especies son monoicas y es una planta predominantemente de autofecundación, pero presenta variaciones significativas en las tasas de cruzamiento debido a fluctuaciones en las condiciones ambientales bajo las cuales crecen. Estudios llevados a cabo en India, han determinado en *A. cruentus* un porcentaje de polinización cruzada por viento entre 25 y 35%, en tanto que en *A. caudatus* este porcentaje estuvo entre 11 y 20% y en *A. hypochondriacus* entre 4 y 11%¹¹.

Raíz

La raíz principal es pivotante, con abundantes raíces secundarias y terciarias, la cuales cumplen la función de absorber agua y nutrientes. La raíz principal junto a las secundarias cumplen la función de sostén de la planta y mantienen el peso de la panoja, llegando a tomar una consistencia leñosa, sobre todo en plantas que se han establecido a una menor densidad. La raíz puede alcanzar 2,4 m de profundidad y extenderse hasta 1,8 m, lo cual explica la gran capacidad que tiene el amaranto de tolerar largos períodos sin riego¹².

Tallo

El tallo es cilíndrico y anguloso con gruesas estrías longitudinales que le dan una apariencia acanalada. Puede alcanzar de 0,4 a 3,0 m de longitud, cuyo grosor puede fluctuar entre 2 a 10 cm de diámetro, dependiendo de la densidad de plantas; en general el grosor disminuye de la base al ápice³. Las plantas de *A. hypochondriacus* y *A. caudatus*, presentan una mayor altura, las que en promedio fluctúan entre 1,8 y 2,3 m, en tanto que en *A. cruentus* la altura promedio es de 1,4 m¹³. Estudios llevados a cabo en Chile, han determinado alturas promedio que fluctúan entre 0,85 y 1,7 m.

La coloración del tallo depende de los genotipos, observándose que en algunos casos presenta tonos verdes, rojos, púrpuras y en algunas ocasiones las estrías son de un color diferente a la del color de fondo del tallo (Fig. 1). Generalmente, *A. hypochondriacus* presenta tallos verdes con estrías, en tanto que en *A. cruentus* presenta una mayor variabilidad de colores, observándose tallos de color rojo o púrpura, dorado, verde y verde con estrías de color rojo o púrpura. En *A. caudatus* en tanto predomina el color verde⁵.



VERDE CON ESTRÍAS

DORADO

ROJO O PÚRPURA

VERDE

Fig. 1. Coloración de tallos de plantas de amaranto.

En general las plantas presentan solo un eje principal, el cual tiende a tener ramificaciones desde el tercio superior del tallo, originándose desde yemas ubicadas en las axilas de las hojas. El número de ramificaciones es dependiente de la densidad de población en la que se encuentre el cultivo y del genotipo. Dada la alta plasticidad que presentan las plantas, es posible observar, bajo ciertas condiciones ambientales o de estrés, ramificaciones desde la base del tallo¹⁴.



Fig. 2. Forma y color de hojas de amaranto⁷

Hojas

Las hojas son alternas, pecioladas, sin estípulas de formas ovales, elípticas, opuestas o alternas con nervaduras prominentes en el envés, lisas o poco pubescentes de color verde o púrpura cuyo tamaño disminuye de la base al ápice, presentando borde entero, de tamaño variable de 6,5-15 cm⁷ (Fig. 2). Las hojas presentan además de clorofila, pigmentos como antofitas y carotenos para la coloración amarilla; además, la coloración roja de las hojas y tallos se debe a la presencia de betacianinas (amarantina e isoamarantina) presentes en algunas especies^{15,16}.

Inflorescencia

La inflorescencia del cultivo de amaranto corresponde a panojas cuyos colores son muy vistosos, siendo uno de los caracteres con mayor variación, encontrándose colores que pueden ir desde el amarillo, anaranjado, café, verde, rojo, rosado, púrpura y una mezcla de estos colores, por lo que en ocasiones se les denomina como payasitas¹³ (Fig. 3).



Fig. 3. Colores y formas de panojas de amaranto

Estas panojas pueden ser terminales o axilares y variar de totalmente erectas hasta decumbentes. Además, pueden ser amarantiformes, es decir cuando los amentos de dicasios son rectilíneos o compuestos, dirigidos hacia arriba o abajo según sea la inflorescencia erguida o decumbente, respectivamente o, glomeruladas cuando estos amentos de dicasios se agrupan formando glomérulos de diferentes tamaños. El largo de la panoja varía según su forma, pudiendo ir entre 0,3-0,9 m⁷ y estudios llevados a cabo en Chile, han determinado largo de panojas que fluctúan entre 0,35 y 0,65 m.

El amaranto presenta flores unisexuales pequeñas, estaminadas y pistiladas; las primeras se ubican en la base o centro del glomérulo y las segundas lo circundan. El glomérulo (racimos florales ramificados), es una ramificación dicasial cuya primera flor es terminal y siempre masculina, en cuya base nacen dos flores laterales femeninas, cada una de las cuales origina otras dos flores laterales femeninas y así sucesivamente (Fig. 4). Un glomérulo puede contener 250 flores femeninas. El androceo está formado por cinco estambres de color morado y el gineceo presenta ovario esférico, coronado por tres estigmas filiformes y pilosos, que aloja a una sola semilla¹⁷.

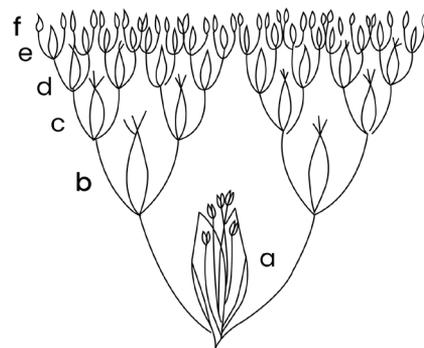


Fig. 4. Esquema de un glomérulo. (a) flor masculina; (b - f) generación de flores femeninas.

La antesis comienza desde el punto medio del eje central de la panoja hacia las ramificaciones laterales de esta misma, observándose que, dependiendo del tamaño de la panoja, es posible encontrar en un mismo momento flores recién abriendo y semillas ya maduras, lo cual se traduce en una desventaja para la cosecha mecánica y uniformidad en la madurez¹⁸.

Fruto

Es una cápsula pequeña, que en botánica corresponde a un pixidio unilocular que se abre de forma transversal en la madurez y deja caer la parte superior llamada opérculo, dejando al descubierto una estructura llamada urna, donde se encuentra la semilla, la cual cae libremente, lo que indica que el fruto es dehiscente¹⁹.

Semilla

La semilla es muy pequeña y mide de 1,0 a 1,7 mm de diámetro, variando su tamaño según la especie; así por ejemplo las semillas de *A. hypochondriacus* miden 1 mm de diámetro, en tanto que las de *A. caudatus* 1,1 a 1,4 mm, existiendo entre 1.000 a 3.000 semillas por gramo. Su forma es ligeramente aplanada y su color puede variar desde el blanco amarillento, dorado, rojo, rosado, púrpura y negro^{8,20}.

Una planta de amaranto puede producir entre 50.000 y 200.000 semillas²¹ y en base a estos cálculos una panoja puede producir entre 17 y hasta 200 gramos de granos.

En la semilla se distinguen cuatro partes importantes: el epispermo que corresponde a la cubierta seminal; el endosperma; el embrión formado por los cotiledones, siendo esta la capa más rica en proteínas y una capa interna llamada perispermo, rico en almidón²² (Fig. 5).

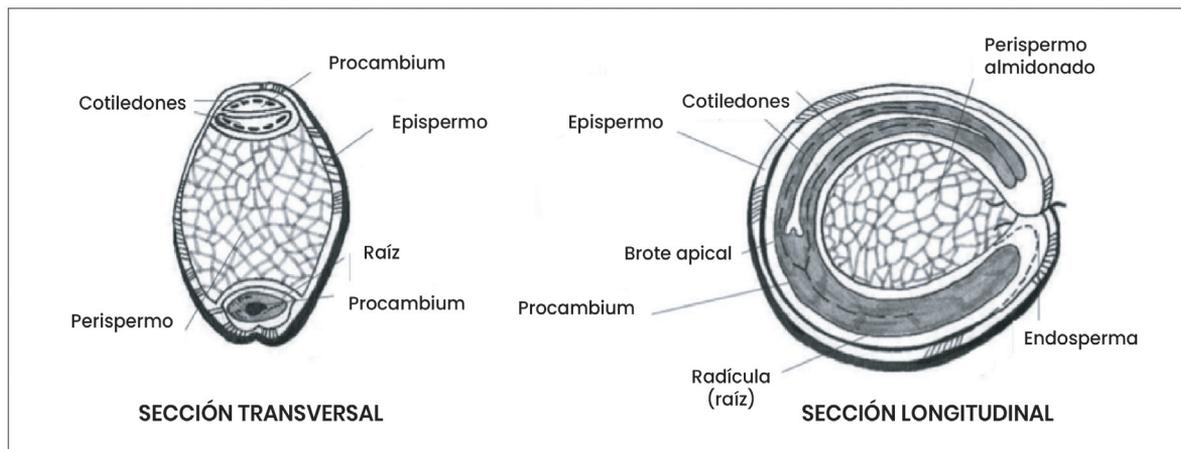


Fig. 5. Esquema de semilla de *A. cruentus* en sección transversales y longitudinal

Fases fenológicas

La fenología de un cultivo corresponde a cambios cualitativos que se presentan en las plantas en el que aparecen distintos órganos o estructuras (hojas, tallo, flores, granos), determinando con ello el inicio y fin de distintas etapas de desarrollo del cultivo, en donde la prioridad en la repartición de fotoasimilados cambia. Es así como en las primeras etapas de desarrollo se forman estructuras de anclaje, luego ocurre la generación de hojas, tallos y finalmente el crecimiento del grano, siendo este último el destino principal de fotoasimilados durante la etapa final de desarrollo del cultivo.

El reconocimiento de cada una de las etapas fenológicas de un cultivo es de suma importancia para hacer un manejo adecuado del mismo. Al igual que otros cultivos, el ciclo de vida del amaranto se divide en fases vegetativas y reproductivas (Cuadro 1) y dentro de cada una de ella es posible determinar ciertos estados que, en este caso, se han definido según el código BBCH (Instituto Federal de Biología) (Fig. 6 y Fig. 7)²³.

La etapa de desarrollo 10 corresponde a la emergencia del cultivo, la cual ocurre entre 3 y 9 días desde la siembra, dependiendo de las condiciones climáticas.

La emergencia de la inflorescencia (etapa 5) representa el inicio del período crítico del cultivo, considerado como aquel a partir del cual cualquier factor de estrés (biótico o abiótico) puede generar las mayores pérdidas de rendimiento, asociadas principalmente a la menor producción de granos por m².

La etapa 60, corresponde al inicio de la floración, la cual comienza desde el punto medio del eje central de la panoja hacia los extremos de esta. La floración debe observarse a medio día, ya que en horas de la mañana y al atardecer las flores se encuentran cerradas. Durante esta etapa la planta comienza a eliminar las hojas inferiores, más viejas y de menor eficiencia fotosintética.

En la madurez fisiológica (etapa 85) las semillas presentan una apariencia elíptica redondeada y su textura es ligeramente rugosa, con una coloración marfil en los bordes y más opaca al centro, similar a un “ojo de gato”. En esta etapa las semillas son fácilmente desprendibles de las panojas al sacudir la planta, también es factible visualizarlo a través del cambio de color de la panoja; así, en panojas verdes, éstas cambian de color verde brillante a verde oscuro y en panojas rojas cambian de color rojo a café-rojizo y las panojas más anaranjadas se tornan doradas.

Cuadro 1. Estado de desarrollo de amaranto según el código BBCH

ETAPA VEGETATIVA	
0 Germinación	
09	Aparición de cotiledones a través de suelo
1 Desarrollo de hoja	
10	Cotiledones totalmente emergidos/Apertura de cotiledones.
11	Primer par de hojas visibles
13	Cinco a seis hojas visibles
ETAPA REPRODUCTIVA	
5 Emergencia de la inflorescencia	
50	Comienzo de la emergencia de la panícula (panícula aún encerrada por hojas)
51	Hojas que rodean la inflorescencia separadas, la inflorescencia es visible desde arriba
55	Panícula visible con un tamaño aproximado de 2 cm
59	Inflorescencia visible, pero todas las flores aún están cerradas.
6 Antesis e inflorescencia axilar	
60	Comienzo de la antesis: flores de la inflorescencia principal con las primeras anteras visibles en la mayoría de las panículas.
65	Plena Floración: anteras visibles en la mayoría de las panículas
7 Desarrollo de frutos y semillas	
70	Inicio de llenado de grano
75	Granos de coloración blanca de tono opaco y consistencia pastosa.
8 Maduración de semillas	
85	Masa dura: Grano con contenido sólido y triturado fácilmente con las uñas (Madurez fisiológica)
89	Grano maduro: difícil de triturar con las uñas, contenido seco, el grano tiene un color marfil opaco en su exterior. Listo para cosechar.
9 Senescencia	
95	Panícula cambia de color

En general las plantas inician su etapa reproductiva entre los 40 a 70 días, lo cual coincide con los estudios llevados a cabo en la zona central de Chile, observándose que en la especie *A. cruentus* se inicia esta etapa entre los 48 y 51 días, llegando a madurez fisiológica en un promedio de 114 días, en tanto que *A. hypochondriacus* presenta un ciclo de desarrollo más largo, iniciando la emisión de panojas entre los 65 y 70 días y llegando a madurez fisiológica entre los 128 y 169 días, dependiendo de la zona de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Días requeridos por las plantas de amaranto para completar diferentes estados de desarrollo.

Código BBCH	0	1			5	6	7	8
Etapa	00-09	10	11	12-13	50-59	60-69	70-77	80-99
Etapa fenológica	Germinación	Apertura de cotiledones	2 hoja verdaderas	5-6 hojas	Inflorescencia apical	Antesis Inflorescencias axilares	Desarrollo de la semilla	Maduración y senescencia
Días desde siembra	3-4	4-5	8-10	21-33	40-57	69-79	84-113	120-153
	Etapa vegetativa				Etapa reproductiva			
Estudios hechos en Chile (días desde siembra)*								
<i>A. cruentus</i>	4-6	-	-	-	48-51	65-70	70-90	110-118
<i>A. hypochondriacus</i>	4-6	-	-	-	69-75	87-95	82-115	128-169

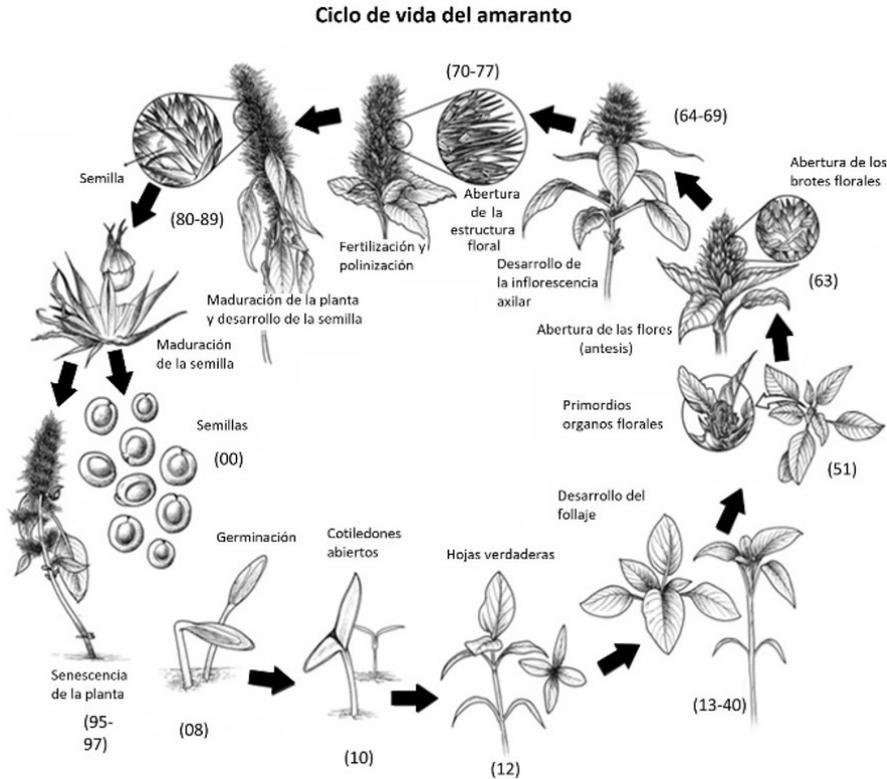


Fig. 6. Ciclo de vida del amaranto. El término entre paréntesis es el código BBCH²³.



Fig. 7. Etapas de desarrollo del amaranto. Los números indicados en cada imagen corresponden al código BBCH.

La principal variable predictora de la fenología es la temperatura, a partir de la acumulación de días grado, o tiempo térmico, se puede estimar aproximadamente la fecha en que ocurrirán los diversos eventos de la fenología del cultivo²⁴. Estos valores varían entre especies y genotipos, no obstante, son relativamente constantes en el periodo de crecimiento del cultivo (Cuadro 3).

La aparición foliar también responde a la acumulación de temperatura y en este sentido, el término filocrono corresponde al tiempo térmico necesario para la aparición de una hoja. En el caso del genotipo CB-01 de *A. cruentus*, en estudios llevados a cabo en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se determinó un filocrono de 25°C día hoja⁻¹, considerando una temperatura base de 8°C. Para los genotipos de la especie *A. hypochondriacus* se han determinado valores de filocrono entre 33 y 37°C día hoja^{-1,25}.

Cuadro 3. Requerimiento térmico para etapas fenológicas de *A. cruentus* genotipo CB-01 en la zona central del país. Temperatura base para Tiempo Térmico de 8°C.

Etapas fenológicas	Tiempo días	Tiempo Térmico °C día
Emergencia	8	54
Inicio de panoja	57	536
Antesis (floración)	64	618
Madurez fisiológica	113	1.184

Otra variable que puede afectar la fenología de un cultivo es su sensibilidad al fotoperiodo, esto hace referencia a la necesidad de un largo de día específico para florecer. En este sentido, existen plantas de día corto, que son aquellas que florecen cuando el período de luz es inferior a un cierto valor crítico, en tanto que las plantas de día largo florecen si el período de iluminación es mayor a un cierto valor crítico. Por su parte las plantas de día neutro florecen independientemente de la longitud del día.

Muchos de los amarantos son sensibles a la longitud del día (fotoperíodo), existiendo variabilidad entre y dentro de las especies. La mayor sensibilidad se expresa por la reducción en el número de hojas o en la estatura de la planta debido a la reducción o al acortamiento de entrenudos y un acortamiento en la duración de ciclo de desarrollo⁴.

La mayoría de las especies de amaranto florecen cuando la duración del día es menor a 12 horas, por ende, se puede decir que el cultivo de amaranto es sensible al fotoperiodo de día corto. Diversos estudios han demostrado que *A. hypochondriacus* presenta una mayor sensibilidad en comparación a *A. cruentus*, reduciendo su rendimiento a medida que el fotoperiodo se alarga más allá de 11 horas luz^{24,26,27,28,29}.



4. Ecofisiología del amaranto

Dra. Paola Silva C. y
Dra. Cecilia Baginsky G.

Fisiología

El amaranto pertenece a un grupo de plantas de crecimiento rápido y es una de las pocas dicotiledóneas con una fotosíntesis muy eficiente, que les permite utilizar el CO_2 disponible en el aire para concentrarlo en el cloroplasto de células especializadas. Su vía fotosintética se conoce como ruta C_4 de Hatch Stack, lo que significa que el primer producto de la fotosíntesis es un ácido orgánico de cuatro carbonos; además, carecen de fotorrespiración, por lo que, bajo condiciones de altas temperaturas y alta intensidad lumínica, genera altas tasas fotosintéticas gracias a su eficiente uso del carbono, observándose una máxima actividad fotosintética a 40°C ³⁰.

El amaranto presenta una mayor eficiencia en el uso del agua (EUA) que cultivos de metabolismo C_3 . Esto se explica porque las plantas del tipo C_4 no presentan pérdidas de CO_2 por fotorrespiración y, a pesar de mantener sus estomas parcialmente cerrados frente a una condición de estrés hídrico, la relación de conversión de CO_2 a hidratos de carbono por unidad de pérdida de agua, es más eficiente en estas plantas. Se ha observado además que, bajo una condición de estrés hídrico, las plantas reducen la pérdida de agua por transpiración y mediante ajuste osmótico pueden tolerar pérdidas de agua sin marchitarse ni morir¹⁸. Estudios llevados a cabo en amaranto determinaron que, cuando las plantas eran sometidas a sequía prolongada, el contenido de clorofila no se alteraba, a diferencia de los carotenoides, los cuales aumentaron, lo que demuestra un efecto fotoprotector de estos compuestos sobre el aparato fotosintético³¹.

Se ha demostrado además que las plantas C_4 invierten más nitrógeno en las proteínas captadoras de luz, lo que sugiere que ellas tienen una conversión de energía luminosa y una tasa de transporte de electrones más altas que las C_3 ³². Además, se ha observado que en estas plantas existe una mayor asignación de nitrógeno foliar y una alta correlación entre esta mayor asignación y su capacidad fotosintética³³.

Cabe destacar además que el amaranto es fenotípicamente plástico, lo que hace referencia a la capacidad del cultivo para modificar su fenotipo en respuesta a las condiciones ambientales, tales como el estrés por sequía³⁴, donde se ha observado el desarrollo de un extenso sistema de raíces laterales³⁵. Otros estudios han informado aumentos en el contenido de betacianina³⁶ y de prolina, activando esta última, enzimas antioxidantes para eliminar las especies reactivas de oxígeno bajo condiciones de déficit hídrico³⁷.

Todos estos aspectos le permiten al cultivo de amaranto tolerar de mejor manera ambientes con una menor disponibilidad hídrica, con calor extremo y alta intensidad solar (zonas áridas y semiáridas) lo que contribuye a la amplia adaptabilidad geográfica de esta especie y hace del amaranto una excelente opción para hacer frente al cambio climático.

En relación con la altitud que toleran las plantas, se ha observado que su adaptación es bastante amplia, ya que crece satisfactoriamente desde el nivel del mar hasta 3.200 m.s.n.m. Su distribución respecto de la altitud está relacionada con los requerimientos térmicos de las diferentes especies; así, *A. caudatus* se puede cultivar a altitudes mayores de los 3.000 m.s.n.m., ya que se adapta mejor a temperaturas bajas, pudiendo incluso tolerar algunas heladas durante la etapa vegetativa³⁸. Por el contrario, *A. hypochondriacus* y *A. cruentus* no toleran heladas, y su rango de requerimientos térmicos es mayor, adaptándose a menores altitudes³⁹.

Crecimiento

El crecimiento del cultivo es un cambio cuantitativo resultado de la producción, transporte y acumulación de fotoasimilados provenientes de la fijación de dióxido de carbono, producto de la fotosíntesis⁴⁰. La tasa de producción de estos fotoasimilados resulta del balance de dos procesos, la fotosíntesis bruta y la respiración. Debido a que la fracción de carbono fijado que se destina a respiración es constante, el aumento en radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo genera un aumento proporcional en el crecimiento del cultivo^{41,42}. El tamaño del dosel y su arquitectura determina la cantidad de radiación interceptada por el cultivo.

La tasa de crecimiento del cultivo puede ser cuantificada por medio de la eficiencia de la cubierta vegetal para convertir la radiación solar interceptada en producción de nueva biomasa (EUR). Al integrar este proceso a lo largo del ciclo de desarrollo, se puede estimar la producción de biomasa potencial del cultivo, la cual se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$MST = EUR \int_{t_i}^{t_f} I_o \cdot f \cdot dt$$

<i>MST</i>	Biomasa área del cultivo (g m ⁻²)
<i>I_o</i>	Radiación fotosintéticamente activa incidente diaria (MJ m ⁻² día ⁻¹)
<i>f</i>	Fracción de la radiación diaria interceptada
<i>EUR</i>	Eficiencia en el uso de radiación interceptada en producción de materia seca (g MJ ⁻¹)
<i>t_f-t_i</i>	Duración del periodo de crecimiento en días (Emergencia-Madurez fisiológica)

La interceptación de la radiación (f) varía a lo largo del ciclo del cultivo (Fig. 8), dependiendo de su desarrollo foliar; no obstante, se puede estimar fácilmente conociendo dos variables. Una de ellas es el Índice de área foliar (IAF), que se define como la unidad de superficie foliar por unidad de suelo⁴³ y es producto de la aparición y expansión de hojas. Su valor aumenta gradualmente a lo largo del ciclo de vida de un cultivo hasta llegar a un máximo, para luego disminuir. En el caso del amaranto, el máximo IAF se obtiene en el estado de antesis (Fig. 9).

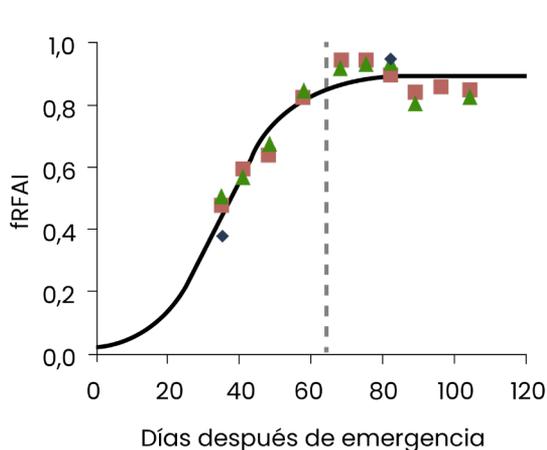


Fig. 8. Fracción de radiación interceptada en amaranto. La línea segmentada señala antesis.

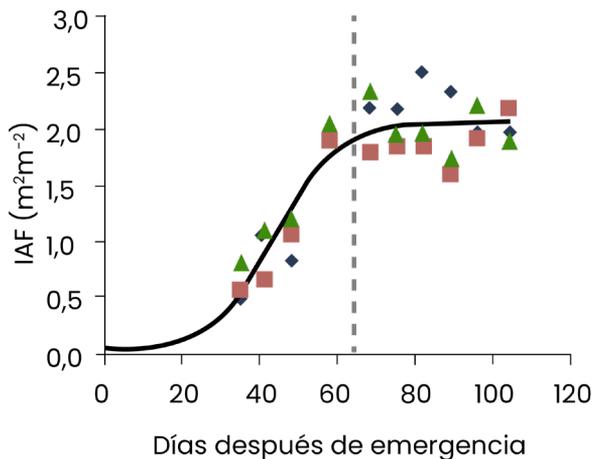


Fig. 9. Índice de área foliar en amaranto. La línea segmentada señala antesis.

La otra variable que afecta la fracción de radiación interceptada ($fRFAI$) es el coeficiente de extinción lumínica (k), el cual está determinado por la arquitectura de la planta y el ángulo de inclinación de las hojas⁴⁴. El coeficiente de extinción es específico para cada especie y variedad y aumenta proporcionalmente hasta la antesis del cultivo, para posteriormente disminuir, al igual que lo hace el IAF, durante el periodo de llenado de granos. No obstante, esta variación durante el ciclo de desarrollo no es significativa, por lo que se considera un valor constante de k . Para el cultivo de amaranto se determinó que el valor de k para la especie de *Amaranthus cruentus* es de 1,03⁴⁵ y para *A. hypochondriacus* es 1,1²⁵, ambos valores son considerados altos en comparación a otras especies y además son equivalentes a un dosel con hojas con orientación horizontal. Una vez estimados el IAF y k de un cultivo, se puede calcular la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el dosel (f) mediante la siguiente ecuación, definida por la ley de Beer-Lambert^{46,47,48,49}:

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

La eficiencia de uso de la radiación (EUR) está definida como la cantidad de materia seca producida por unidad de energía solar interceptada o absorbida por el cultivo. Las principales diferencias son atribuibles al tipo de metabolismo del carbono de la especie y por el tipo de composición química de la materia seca producida. Por ejemplo, plantas C_4 (ej.: maíz, caña de azúcar, amaranto) tienen una mayor EUR que las plantas C_3 (ej.: trigo y maravilla); por otro lado, plantas oleaginosas son menos efectivas en la conversión de radiación solar interceptada que plantas no oleaginosas⁴⁰. La EUR es específica para cada especie, genotipo y variedad y para el cultivo de amaranto se han estimado valores entre 2,26 y 2,57 $g\ MJ^{-1}$ para *Amaranthus hypochondriacus*²³ y valores entre 2,48 y 2,85 $g\ MJ^{-1}$ para el híbrido *A. hypochondriacus* x *A. hybridus*⁵⁰. Estos valores están acordes a cultivos con metabolismo C_4 , como lo es el amaranto y otras especies como el maíz, para el cual se han informado valores de EUR superiores a 2,5 $g\ MJ^{-1}$.

Valores diarios o promedios semanales de fracción de radiación interceptada (f) y EUR, se pueden estimar fácilmente, mediante la ecuación de tasa de crecimiento, una biomasa potencial del cultivo de amaranto; no obstante, solo una fracción de la biomasa acumulada durante la temporada es destinada a la producción de granos. Esta fracción es denominada índice de cosecha (IC), el cual varía con el genotipo, el ambiente y su interacción. El índice de cosecha es un coeficiente utilizado como estimador de rendimiento primario bajo condiciones óptimas^{51,52} y como indicador de rendimiento económico⁵³. En Chile, en un ensayo sin limitaciones hídricas y nutricionales, se estimó un IC de 0,37 para *A. cruentus* genotipo CB-01.

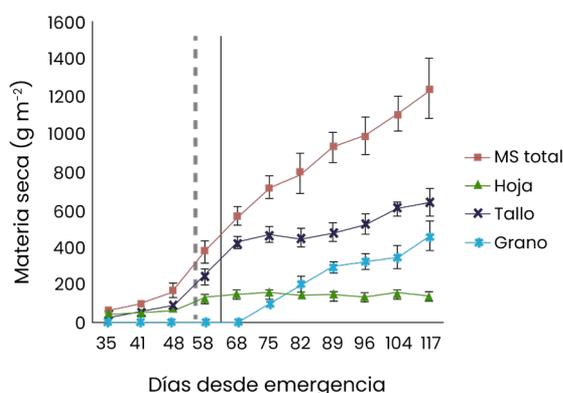


Fig. 10. Distribución de materia seca durante el ciclo de desarrollo de amaranto.

Al estudiar la distribución de materia seca a lo largo de la temporada (Fig. 10), se puede observar que, previo al inicio de emisión de panoja (línea gris segmentada), comienza un crecimiento exponencial de materia seca, el cual está dado principalmente por una mayor acumulación de ella en los tallos, la que tiende a estabilizarse una vez iniciada la floración. En el caso de las hojas, se observa una estabilización a inicios de emisión de panoja. Por tanto, el aumento de la materia seca total de la planta post floración se debe al crecimiento exponencial de la materia seca de la panoja junto a los granos⁵⁴.





5. Adaptación de variedades de amaranto en la zona central de Chile

**Dra. Paola Silva C. y
Dra. Cecilia Baginsky G.**

En la actualidad el amaranto no se siembra de manera comercial en Chile, existiendo siembras en pequeñas superficies y en muchos casos se le encuentra en huertas e incluso en jardines, donde es utilizada como planta ornamental. Las siembras se hacen con los mismos granos que se obtienen de estas huertas y/o con granos provenientes de alimentos comerciales. Sin embargo, la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile desarrolló un genotipo relativamente estable de *Amaranthus cruentus*, obtenido a través de selección masal. Este genotipo, denominado CB-01, presenta una buena adaptación a la zona central del país.

En México se usan comúnmente variedades criollas (tradicionales) pertenecientes a las poblaciones locales y que se caracterizan por ser altamente variables en altura, color de panoja, rendimiento de planta, duración del ciclo vegetativo y contenido nutricional; variabilidad que complica el manejo de estas variedades. En una menor proporción se emplean variedades mejoradas desarrolladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala y la Universidad Autónoma Chapingo.

En un proyecto de Cooperación Chile-México financiado por la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) el año 2016, se introdujeron a Chile un grupo de estas variedades mejoradas de amaranto desde México, con las cuales se han hecho estudios de adaptación bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo (Cuadros 4 y 5).

Cuadro 4. Características de los genotipos de *Amaranthus cruentus* L. evaluadas en Chile.

	Variedades de <i>Amaranthus cruentus</i> L.	
	Amaranteca	Benito
Origen	INIFAP	INIFAP
Color tallo	Verde	Dorado
Color hoja	Verde	Verde
Color panoja	Verde claro	Dorada
Color grano	Blanco marfil	Blanco marfil
Altura (cm)	180-220	130-215
Días desde siembra a cosecha	110-140	115-150

Cuadro 5. Características de los genotipos de los *Amaranthus hypochondriacus* L. evaluadas en Chile.

Variedades de <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.					
	Nutrisol	Revancha	Diego	Areli	PQ2
Origen	INIFAP	INIFAP	Universidad Autónoma Chapingo	Universidad Autónoma Chapingo	Universidad Autónoma Chapingo
Color tallo	Rojo con estrías verdes	Verde con pigmentación en la base	Verde	Verde	Verde
Color hoja	Verde púrpura con pecíolos y nervaduras púrpuras	Verde	Verde púrpura en plántula, verde oscuro en floración	Verde púrpura en plántula, verde oscuro en floración	Verde
Color panoja	Púrpura	Verde	Púrpura	Verde al emerger, se torna pardo y a la madurez rosado	Verde claro
Color grano	Blanco marfil	Blanco marfil	Blanco marfil	Blanco	Blanco
Altura (cm)	165-250	101-162	160-220	180-220	180-250
Días desde siembra a cosecha	175-220	130-140	150-160	150-170	150-170

Es importante destacar que tanto la diversidad genética como fenotípica varían de acuerdo con las características eco geográficas del lugar de origen, lo que determinará una selección genética específica y, por lo tanto, al cambiarlos a un ambiente diferente cambiará el grado de expresión de los caracteres de las plantas⁵⁵. En términos generales los genotipos pueden o no adaptarse a un ambiente en la medida que haya coincidencia entre la fecha de floración del genotipo y las condiciones ambientales favorables para su crecimiento y desarrollo⁵⁶. Si el genotipo tiene esta sincronización con el ambiente, este puede tener una adaptación específica, es decir, el genotipo puede tener un rendimiento superior a otros genotipos en algún ambiente en particular o tener adaptación amplia, donde el genotipo tiene un rendimiento que no cambia mucho entre ambientes^{9,57}.

Para identificar la adaptación de las variedades de amaranto en la zona central de Chile, se evaluaron siete genotipos de amaranto provenientes de México: Benito y Amaranteca pertenecientes a *A. cruentus* y PQ2, Areli, Diego, Nutrisol y Revancha, pertenecientes a la especie *A. hypochondriacus*, además del genotipo CB-01 de *A. cruentus* proveniente de Chile. Para esto se probó su adaptación en cuatro ambientes diferentes, variando la fecha de siembra y localidades durante la temporada 2017-2018 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Descripción de ambientes de sitios de evaluación de genotipos de amaranto durante la temporada 2017-2018.

Ambiente	Localidad	Fecha siembra	Largo ciclo días	Duración día hrs	Temp.media °C
1	Isla de Maipo	29 sep	165	13,6	18,0
2	Isla de Maipo	21 dic	105	13,2	19,1
3	San Fernando	19 dic	107	12,7	20,8
4	San Fernando	11 ene	113	12,4	19,2

Las localidades de Isla de Maipo (33°46'35,34" S; 70°53'53,85" O, y 342 m.s.n.m.) y San Fernando (34°36'23,6" S; 70°58'41,6" O, y 350 m.s.n.m.) se ubican en la zona central de riego de la Región Metropolitana y de O'Higgins, respectivamente. El ambiente 1 fue el que tuvo la siembra más temprana, con una menor temperatura promedio y por ende un mayor largo de ciclo. El resto de los sitios tuvieron un largo de ciclo similar.

Los resultados demostraron que los genotipos de *A. hypochondriacus* tuvieron un ciclo de desarrollo más largo, con un promedio de siembra a inicio de emisión de panoja y a madurez fisiológica de 68 y 126 días, respectivamente, versus los 59 y 113 días observados para los de *A. cruentus*, siendo los genotipos Benito y Amaranteca los más precoces (112 días a madurez fisiológica como promedio en los cuatro ambientes) y Areli y Nutrisol los más tardíos (133 días a madurez fisiológica como promedio en los cuatro ambientes). Cabe destacar que la siembra más temprana (ambiente 1) generó una mayor diferencia en el ciclo de desarrollo entre los genotipos; así, los genotipos más tardíos maduraron 45 días después que aquellos más precoces, mientras que en la fecha más tardía (ambiente 4) estas diferencias prácticamente desaparecieron.

Al estimar el comportamiento medio de los ocho genotipos de amaranto en los cuatro ambientes evaluados, se obtuvo un rendimiento entre 1.869 y 3.385 kg ha⁻¹, siendo el ambiente 3 en donde se alcanzó el mayor rendimiento y número de granos por metro cuadrado, además de obtener el mayor valor de índice de cosecha, junto al ambiente 4 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha y componentes de rendimiento de amaranto en cada ambiente.

Ambiente	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	IC	Nº granos m ⁻²	Altura m
1	11.599 a	1,869 b	0,18 b	244.929 b	2,26 a
2	9.494 b	1,915 b	0,20 b	235.183 b	2,12 a
3	13.348 a	3,385 a	0,26 a	406.338 a	2,14 a
4	9.342 b	2,315 b	0,25 a	282.826 b	2,16 a

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticas significativas con un p-valor ≤ 0,05, con la prueba DGC.

Al comparar especies, *A. cruentus* obtuvo en promedio un mayor rendimiento, índice de cosecha y número de granos por metro cuadrado. Sin embargo, *A. hypochondriacus* obtuvo una mayor biomasa y altura de plantas (Cuadro 8)

Cuadro 8. Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha y componentes de rendimiento según especie de amaranto.

Especie	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	IC	PMG g	Nº granos m ⁻²	Altura m
<i>A. cruentus</i>	10.075 b	2.577 a	0,25 a	0,82 a	313.932 a	2,08 b
<i>A. hypochondriacus</i>	11.468 a	2.248 b	0,20 b	0,80 a	279.351 b	2,22 a

Letras distintas, en sentido vertical, indican diferencias estadísticas con un valor p -valor $\leq 0,05$, con la prueba de contrastes. PMG: peso de 1.000 granos.

En este sentido, diversos estudios indican que *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* difieren en el rendimiento de grano según la altitud donde son cultivados, debido a una adaptación diferencial a la temperatura producto de la altitud^{58,59,14}. Se ha observado que *A. cruentus* puede rendir más que *A. hypochondriacus* en zonas con clima templado cálido, donde las temperaturas máximas en floración pueden llegar a los 40°C, mientras que *A. hypochondriacus* puede tener un mayor rendimiento que *A. cruentus* en zonas con temperaturas medias máximas menores a 27°C^{12,60}. En este aspecto cabe destacar que, en la zona central de Chile, específicamente en la depresión intermedia, las temperaturas medias máximas en enero (mes en que podría florecer el amaranto) superan los 28°C^{61,62} por lo que *A. cruentus* se adaptaría mejor a estas condiciones.

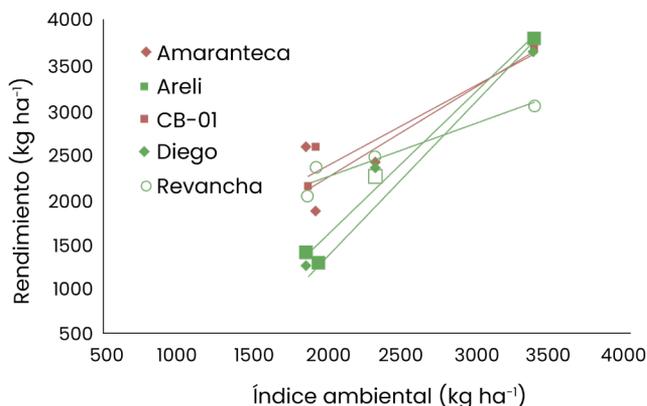
Entre genotipos, CB-01, Amaranteca y Revancha, los dos primeros de la especie *A. cruentus* y el tercero de la especie *A. hypochondriacus*, obtuvieron en promedio un mayor rendimiento e índice de cosecha y una menor altura en comparación al resto de los genotipos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha y componentes de rendimiento según genotipo de amaranto.

Genotipo	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	IC	PMG g	Nº granos m ⁻²	Altura m
Amaranteca	9.948 b	2.618 a	0,26 a	0,81 a	321.726 a	1,99 b
Benito	10.312 b	2.397 b	0,23 b	0,83 a	288.480 a	2,28 a
CB-01	9.966 b	2.716 a	0,27 a	0,81 a	331.591 a	1,98 b
Areli	11.046 a	2.195 b	0,20 c	0,80 a	270.989 b	2,32 a
Diego	10.666 b	2.029 b	0,18 c	0,80 a	247.245 b	2,29 a
Nutrisol	13.223 a	2.206 b	0,18 c	0,72 b	306.855 a	2,36 a
PQ2	12.739 a	2.312 b	0,19 c	0,82 a	280.188 b	2,26 a
Revancha	9.668 b	2.493 a	0,27 a	0,85 c	291.476 b	1,88 c

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas con un p -valor $\leq 0,05$, con la prueba DGC. PMG: peso de 1.000 granos.

Al analizar el comportamiento de todos los genotipos en cada ambiente, se determinó que existe una interacción genotipo x ambiente significativa para la variable de rendimiento (Fig. 11).



Análisis de estabilidad:

Regresión entre valores de rendimiento de cada genotipo sobre los valores del rendimiento promedio de los genotipos en cada ambiente (índice ambiental).

Valor de pendientes (b) menor a 1,0, implica mayor estabilidad

Fig. 11. Análisis de estabilidad de genotipos

Entre los genotipos con mayor rendimiento promedio, Revancha destaca por tener un rendimiento muy estable, según la metodología de análisis de estabilidad⁶³ (Fig. 11), donde la pendiente fue menor a 1 ($b=0,58$). El genotipo CB-01 lo siguió en estabilidad ($b=0,9$), mientras que el genotipo Amaranteca presentó una estabilidad similar a la media general de los genotipos evaluados ($b=1,04$). Aunque los genotipos Areli y Diego no tuvieron un rendimiento promedio sobresaliente, tuvieron un alto rendimiento en el mejor ambiente (índice ambiental mayor), que disminuyó fuertemente cuando el ambiente no fue favorable, siendo altamente inestables ($b=1,63$ y $1,72$, respectivamente), llegando incluso a tener los más bajos rendimientos en los peores ambientes, por lo que destacan como genotipos de adaptación específica a buenos ambientes.

Se elaboró un gráfico biplot de componentes principales (Fig. 12) con el promedio de los ocho genotipos en los ambientes estudiados y las diferentes variables evaluadas (rendimiento (Rend), bioma (BM), índice de cosecha (IC), número de granos⁻² ($N^{\circ}G\ m^{-2}$), peso seco de los 1.000 granos (P100), altura de planta y largo de panoja, más los días a eventos fenológicos como: inicio de emisión de manoja (IEP), inicio de floración (F) y madurez fisiológica (MF)). En este biplot se observó que la biomasa se correlaciona positivamente con el largo del ciclo del cultivo (IEP, F y MF), sin embargo estas variables no se asocian con el rendimiento, como tampoco lo hizo el P1000. El rendimiento tiene

una correlación positiva con el $N^{\circ}Gm^{-2}$ y el IC, y está correlacionado negativamente con la altura de planta y el largo de la panoja. Los genotipos Amaranteca, CB-01 y Revancha se ubican a la derecha del gráfico, tienen un mayor rendimiento, IC y $N^{\circ} G m^{-2}$. Benito destaca por tener un mayor P1000, mientras de los genotipos PQ2, Areli y Diego tienen mayor altura de planta y largo de panoja. Por último, el genotipo con mayor biomasa y ciclo más largo es Nutrisol.

Con este estudio se pudo concluir que los genotipos con mayor adaptación a la zona central de riego de Chile son CB-01, Amaranteca y Revancha, los cuales tienen un mayor IC y menor altura. El genotipo Revancha de la especie *A. hypochondriacus* se comporta de manera similar a CB-01 y Amaranteca, ambos pertenecientes a la especie de *A. cruentus*. Los genotipos Diego y Areli, ambos de la especie *A. hypochondriacus*, tienen un rendimiento muy inestable, pero con adaptación específica a buenos ambientes.

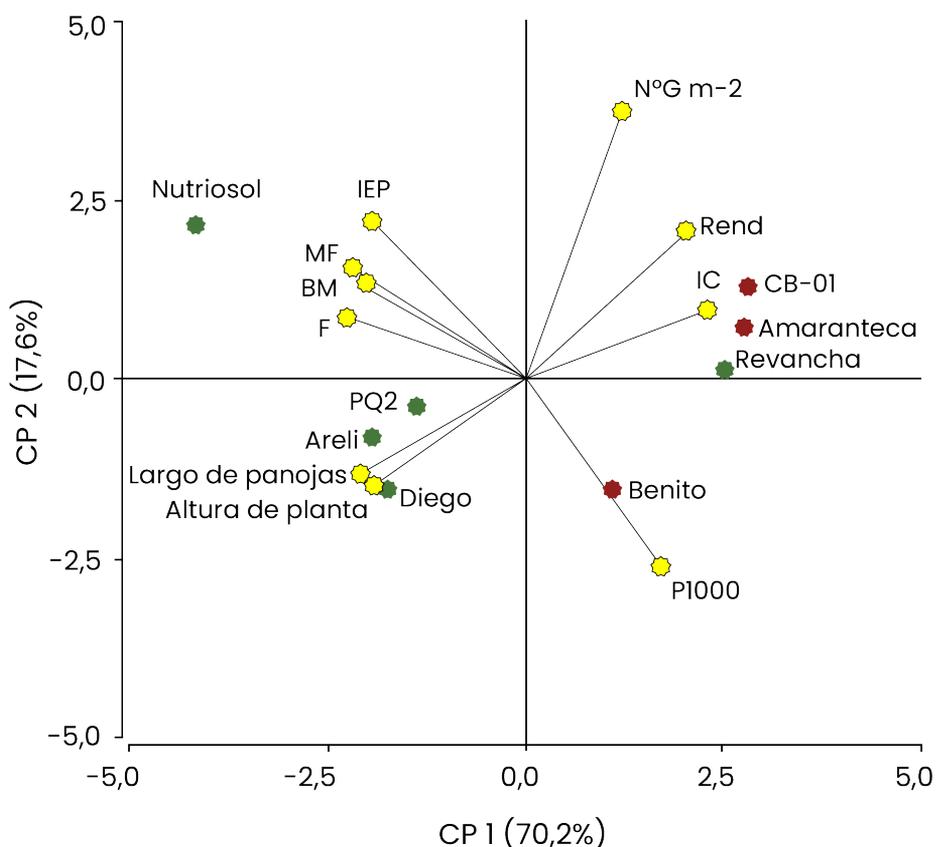


Fig. 12. Gráfico de componentes principales. Círculos de color rojo son genotipos *A. cruentus* y los de color verde son genotipos *A. hypochondriacus*.





6. Requerimiento hídrico y estrés salino del cultivo de amaranto

**Dr. Marco Garrido S.,
PhD. Cristián Kremer F. y
Dra. Cecilia Baginsky G.**

Las plantas requieren de grandes cantidades de agua para cumplir con todos sus procesos, entre los que se encuentran la generación de rendimiento. En el caso del amaranto, esta necesidad es particularmente importante por ser un cultivo que en Chile se desarrolla durante primavera y verano, cuando las precipitaciones son bajas a nulas en algunas regiones y donde la demanda evapotranspirativa de la atmósfera es alta. Por ello, si esta necesidad no es cubierta a través del riego el rendimiento se verá comprometido. Cabe destacar que la etapa de desarrollo es más crítica desde el inicio de emisión de panoja hasta el término de floración.

La evapotranspiración de cultivo (ET_c ; mm d^{-1}) tiene un componente asociado a la superficie de hojas que cubren el suelo y la superficie de suelo mojado y expuesta a radiación, que se integran en los conceptos de coeficiente de cultivo (K_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_o ; mm d^{-1}).

$$ET_c = K_c * ET_o$$

Así como la ET_o varía en función de la época del año, siendo mayor en el periodo estival que en el invernal, el coeficiente de cultivo depende en gran medida de la fenología del cultivo. Para el caso de amaranto, se han reportado valores de K_c de 0,15 para la etapa inicial de desarrollo, de 1,15 para la etapa media en donde el cultivo tiene su cobertura máxima, y de 0,8 para la etapa final, que corresponde al momento de cosecha¹⁵⁰. En ensayos realizados en Alhué ($34^{\circ}3.357'S$; $71^{\circ}14.032'O.$) y Longotoma ($32^{\circ}18.765'S$; $71^{\circ}17.242'O.$) se han estimado valores de K_c para Amaranto bajo condiciones de riego de 0,9 para la etapa media y 0,6 para la etapa final.

Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo representa cuantitativamente las características específicas del cultivo que determinan una mayor o menor demanda respecto del “pasto de referencia” y se describe como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (lo que el cultivo demanda) y la evapotranspiración de referencia (lo que el pasto de referencia demanda). Por tanto, puede entenderse que el coeficiente de cultivo del “pasto de referencia” tiene un valor de 1. Es así como un cultivo puede tener valores de K_c mayores a 1 (el cultivo demanda más agua que el pasto de referencia en las mismas condiciones meteorológicas) o menores de 1 (el cultivo demanda menos agua en las mismas condiciones meteorológicas).

Las variables que influyen sobre el valor del coeficiente de cultivos tienen relación con la arquitectura de los mismos y de la condición micro-meteorológica. Es así como cultivos más densos, más altos, mayores velocidades de viento y menores humedades relativas resultan en coeficientes de cultivo más altos, es decir, cultivos que demandan más agua.

Eficiencia del uso del agua y tolerancia al déficit hídrico

Lo anteriormente descrito hace referencia al uso de agua por parte de la planta, el cual es alto, dado que para que la planta pueda realizar fotosíntesis, y de esta manera crecer y generar rendimiento, debe perder agua a través de la transpiración de manera inevitable. Para que las plantas puedan absorber CO_2 , estas deben abrir unos poros llamados estomas, que se encuentran en la epidermis de las hojas. Esta apertura es óptima en plantas bien hidratadas e implica que las hojas pierdan agua como vapor, proceso conocido como transpiración, pérdida de agua que representa más del 90% del agua que las plantas consumen. El cociente entre el CO_2 asimilado y el H_2O perdida por transpiración desde la hoja se conoce como eficiencia del uso del agua fotosintética (EUA fotosintética).

En un experimento realizado en Isla de Maipo ($33^{\circ}46'35,34''\text{S}$; $70^{\circ}53'53,85''\text{O}$) se determinó que para Amarantho en condiciones de riego, la eficiencia del uso de agua fotosintética tiene valores que fluctúan entre 5,4 y 6,2 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1,64}$, lo cual es un valor representativo de especies de metabolismo fotosintético C_4 . Este rango de valores es mayor que el reportado para especies de metabolismo fotosintético C_3 , menos eficientes, cuyas EUA fotosintéticas se encuentran entre 2 y 3 $\mu\text{mol} [\text{CO}_2] \text{mmol} [\text{H}_2\text{O}]^{-1}$. Esto resulta relevante pues significa que el amaranto es un cultivo que requiere menos agua que otros cultivos para expresar su potencial de rendimiento.

La eficiencia del uso del agua de un cultivo puede ser evaluada a escalas mayores como el cociente entre el rendimiento y el agua aplicada como riego, lo que comúnmente se denomina EUA agronómica. Al calcular esta EUA agronómica para la producción de granos en la localidad de Isla de Maipo con la variedad Benito, se obtuvo un promedio de 1,4 g L^{-1} de agua regada (es decir, 1,4 g de grano por cada litro de agua aplicado, equivalente a 1,4 kg m^{-3}), valor similar al obtenido en otras especies de metabolismo C_4 , tales como el maíz, que presenta una EUA de 1,7 $\text{g L}^{-1,65}$.

Eficiencia del sistema de riego

La eficiencia de los sistemas de riego indica la cantidad de agua que queda disponible en el suelo para las plantas respecto de la cantidad de agua total aplicada. Una eficiencia del 50% significa que la mitad de la lámina de agua aplicada como riego será aprovechada por la planta, mientras que la otra mitad se perderá, principalmente por percolación profunda y escorrentía.

A continuación se presentan eficiencias teóricas como referencia:

- Riegos superficiales (tendido, surco, platabanda): 30-50%
- Aspersión o pivote: 80-90%
- Riego por goteo: 85-95%

Estudios llevados a cabo en las localidades de Alhué (34°3.357'S; 71°14.032'O.), Longotoma (32°18.765'S; 71°17.242'O.) y Pichidegua (34°21'05,72"S; 71°18'41,99'O) donde se evaluó la EUA de dos genotipos (Amaranteca y CB-01) durante dos temporadas, entregaron valores de EUA que fluctuaron entre 1,3 y 2,4 g L⁻¹ de agua regada, observándose que cuando el aporte de agua de riego fue menor (717 m³ ha⁻¹, equivalente a cero reposición de la ETc desde el inicio de la emisión de panoja), si bien, el rendimiento disminuyó, la eficiencia aumentó (Fig. 13).

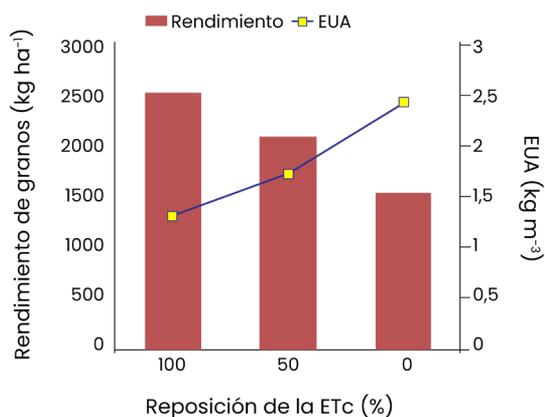


Fig. 13. Rendimiento y eficiencia en el uso del agua (EUA) de plantas de amaranto sometidas a tres niveles de agua de riego (reposición de la ETc en un 100%, 50% y 0% a partir del estado de inicio de emisión de panoja)

Agua aplicada como riego

100%:	1.923	m ³ ha ⁻¹
50%:	1.275	m ³ ha ⁻¹
0%:	717	m ³ ha ⁻¹

Las EUA agronómicas tienden a ser bajas, dado que en ellas se encuentran incorporadas pérdidas de agua tales como evaporación, escorrentía superficial y percolación, es decir, se incluye la eficiencia del riego, entre otros. Es así como, independientemente de que la EUA fotosintética de amaranto sea alta en comparación con otros cultivos, es importante poner atención a la eficiencia del sistema de riego y a la gestión del riego de manera de maximizar la EUA agronómica.

La tolerancia al déficit hídrico puede ser evaluada analizando ciertos rasgos fisiológicos asociados con ella. Una técnica para evaluar estos rasgos es la construcción de curvas de presión – volumen, que relacionan el contenido relativo de agua (CRA) y el potencial hídrico de la hoja⁶⁶. Frente a déficit hídrico, el CRA y el potencial de presión disminuyen, y el potencial hídrico de la hoja se hace más negativo⁶⁷. Cuando el potencial de presión llega a cero, se alcanza el punto de pérdida de turgor y el potencial hídrico es equivalente al potencial osmótico⁶⁸. En base a las curvas de presión–volumen es posible determinar el ajuste osmótico (AO), a través del potencial osmótico a turgor máximo (PSIo), el módulo de elasticidad de la pared (E) y el potencial hídrico en el punto de pérdida de turgor (PSItlp). En condiciones de déficit hídrico, estos rasgos muestran una coordinación entre ellos⁶⁹.

En estudios previos en amaranto bajo déficit hídrico se ha estudiado el AO, sin embargo, no se le ha prestado atención al comportamiento de E y PSItlp⁷⁰. En este sentido, en un ensayo realizado en las localidades de Longotoma (Fig. 14a) y Alhué (Fig. 14b) se determinaron valores de potencial osmótico a turgor máximo (PSIo) y potencial hídrico en

el punto de pérdida de turgor (PSItlp) de dos variedades de amaranto (Amaranteca y CB-01). El PSlo promedio en Alhué, un ambiente de mayor déficit hídrico, fue de $-1,1$ MPa en ambas variedades, mientras que en Longotoma fue de $-0,9$ MPa para ambas variedades. Respecto del PSItlp, tampoco se observaron diferencias entre variedades, siendo su promedio $-1,3$ y $-1,1$ MPa para las localidades de Alhué y Longotoma, respectivamente. Estos valores indican una alta tolerancia de amaranto a la deshidratación de su tejido foliar. Además, se observó que amaranto es capaz de realizar ajuste osmótico de hasta 1 MPa, un proceso fisiológico que confiere tolerancia al déficit hídrico.

Un aspecto interesante que fue observado en este ensayo fue que el amaranto es capaz de ajustar los parámetros de tolerancia PSlo y PSItlp a lo largo de un periodo de déficit hídrico, aumentando su tolerancia a lo largo de la temporada de desarrollo. Sin embargo, la capacidad de tolerar déficit hídrico no evita la pérdida de rendimiento cuando el cultivo se somete a sequía, en especial si este ocurre entre el inicio de emisión de panoja y término de floración.

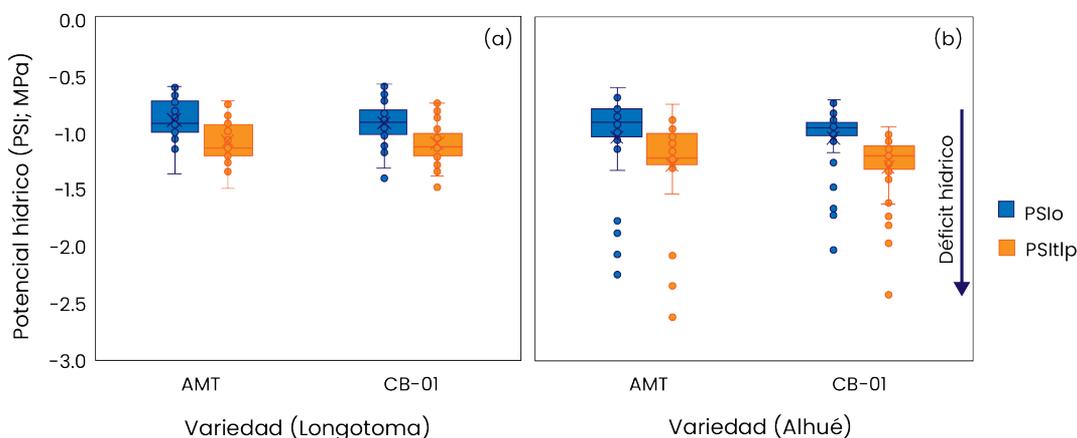


Fig. 14. Potencial osmótico a turgor máximo (PSlo) y potencial hídrico en el punto de pérdida de turgor (PSItlp) de dos variedades de amaranto (AMT: Amaranteca y CB-01) en las localidades de Longotoma (a) y Alhué (b)

Experiencias en Chile: Riego Deficitario

Con el objetivo de analizar la respuesta del amaranto frente a diferentes niveles de riego, se realizó un estudio en la localidad de Isla de Maipo, ubicada en la zona central de Chile ($33^{\circ}46'35,34''S$; $70^{\circ}53'53,85''O.$), donde se evaluaron para la variedad Benito de *A. cruentus*, cuatro niveles de riego aplicados mediante goteo (100-60-30-0%) basados en la evapotranspiración del cultivo (ETc). El experimento se inició cuando las plantas llegaron al estado de inicio de emisión de panoja (es decir, previamente se regaron por igual según requerimientos del cultivo) y, una vez que el cultivo alcanzó la madurez fisiológica, se obtuvieron datos de biomasa total aérea, rendimiento e índice de cosecha (IC).

Los resultados obtenidos mostraron que, a medida que el estrés hídrico se intensificó, se redujo el ciclo de desarrollo del cultivo; así, cuando las plantas estuvieron sometidas a una condición de 0% de la ETc su ciclo fue de 110 días, es decir, 20 días de diferencia en comparación al tratamiento sin estrés hídrico (131 días). El rendimiento fue otro factor afectado, observándose una diferencia promedio de más de 3.500 kg ha^{-1} entre tratamientos de 0 y 100% de la ETc. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la producción de biomasa aérea entre los tratamientos, pero sí en el índice de cosecha obtenido, el cual varió de 0,07 a 0,29 para tratamientos de 0 y 100%, respectivamente. Finalmente, al medir potenciales hídricos foliares durante la cosecha se obtuvieron valores de -0,7, -1,2, -2,1 y -3,1 MPa para los tratamientos de 100, 60, 30 y 0%, lo que demuestra claramente el efecto del déficit hídrico en el cultivo de amaranto (Cuadro 10).

Cuadro 10. Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha, ciclo de desarrollo y potencial foliar de plantas de amaranto sometido a 4 tratamientos hídricos.

Tratamiento %ETc	Biomasa kg ha^{-1}	Rendimiento kg ha^{-1}	IC	Largo ciclo Días	ψ foliar MPa
100	14.836 a	4.258 a	0,29 a	131 a	-0,7 b
60	11.224 a	1.950 b	0,18 ab	124 a	-1,2 b
30	10.801 a	1.666 b	0,15 ab	118 ab	-2,1 a
0	9.206 a	679 b	0,07 b	110 b	-3,1 a

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas. Prueba de rango múltiples de Tukey (p -valor $\leq 0,05$; $n=4$).

En otro estudio en las localidades de Longotoma ($32^{\circ}18.765'S$; $71^{\circ}17.242'O.$ y 92 m.s.n.m.) y Alhué ($34^{\circ}3.357'S$; $71^{\circ}14.032'O.$ y 140 m.s.n.m.), donde se evaluó el rendimiento de las variedades Amaranteca y CB-01 bajo riego deficitario, se observó que, si bien no hubo diferencias de rendimiento entre variedades, el monto regado durante el periodo reproductivo tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento (Cuadro 11).

Cuadro 11. Rendimiento y componentes de rendimiento de los genotipos Amaranteca Y CB-01 en Longotoma y Alhué.

Tratamiento %ETc	Rendimiento kg ha ⁻¹	Peso 1.000 granos g	Números de granos m ⁻²
Longotoma			
0	1.507 b	0,845 a	179.000 b
50	1.499 b	0,843 a	177.000 b
100	2.148 a	0,844 a	255.000 a
Alhué			
0	247 c	0,620 b	40.000 c
50	1.390 b	0,820 a	169.000 b
100	2.200 a	0,800 a	277.000 a

Letras distintas en sentido vertical dentro de cada localidad indican diferencias estadísticamente significativas según prueba LSD - Fisher ($p \leq 0,05$).

En ambas localidades el rendimiento alcanzado con un riego que suplió el 100% de la demanda evapotranspirativa del cultivo (ETc) estuvo entre 2.148 y 2.200 kg ha⁻¹. En Longotoma, una reposición del 50 y 0% de la demanda evapotranspirativa significó alcanzar un rendimiento equivalente a un 70% del máximo, mientras que en Alhué, una reposición del 50% de la ETc implicó alcanzar un rendimiento equivalente al 63% del máximo, en tanto que suspender el riego durante el periodo reproductivo (0% de la ETc) significó un rendimiento equivalente al 11% del máximo, una reducción sustantiva respecto de lo observado en Longotoma. Esto se explica por una menor capacidad de almacenamiento de agua en el suelo en la localidad de Alhué, siendo un ambiente menos adecuado para restricciones severas del suministro de agua. En ambas localidades la variable que explicó en mayor medida la reducción del rendimiento bajo déficit hídrico fue el número de granos por m², por lo que es importante considerar evitar la implementación de riego deficitario durante el periodo de floración en amaranto.

Estrés salino en amaranto

La salinidad es un factor estresante ampliamente extendido en suelos agrícolas, interactuando con la sequía en un escenario de cambio climático⁷¹. Esta tiende a coincidir con zonas donde existe déficit hídrico, por una acumulación de sales en la zona radical, debido a la baja incidencia de precipitaciones que propicien su lavado.

Desde un punto de vista agronómico, un suelo es considerado salino cuando su conductividad eléctrica medida en extracto saturado es mayor a 4 dS m⁻¹ y se habla de riesgo de salinización del suelo cuando la conductividad eléctrica del agua supera los 2 dS m⁻¹. Por lo general, la respuesta de las plantas frente al estrés salino comienza con una disminución en el crecimiento y necrosis o senescencia de sus hojas (por toxicidad) por lo que su capacidad fotosintética se ve fuertemente afectada y disminuye su conductancia estomática^{69,72}. Además, los iones Na⁺ y Cl⁻ son los que, comúnmente, aumentan su concentración cuando hay presencia de sales, lo que podría causar un desorden nutricional al inhibir la absorción de algunos elementos.

En amaranto, uno de los mecanismos de tolerancia a un estrés salino es su capacidad de ajuste osmótico. En un estudio realizado en amaranto bajo condiciones de déficit hídrico realizado en las localidades de Alhué y Longotoma, se observó que es capaz de realizar ajuste osmótico de hasta -1 MPa, un proceso fisiológico que confiere tolerancia al déficit hídrico (Fig. 14). Si bien esto no fue evaluado en condiciones de salinidad, se reporta en la literatura que los rasgos de tolerancia al déficit hídrico pueden ser candidatos aptos para la selección en otras condiciones de estrés que tengan respuestas comunes, como el estrés salino^{73,74}. El ajuste osmótico cumple la función de disminuir el potencial osmótico de los tejidos, y así su potencial hídrico, facilitando la mantención de los gradientes de potencial hídrico que permiten la absorción de agua desde el suelo y su transporte hacia las hojas^{59,75,76}.

El amaranto presenta una tolerancia moderada a la salinidad, observándose que con valores superiores a 5 de dS m⁻¹ se produce una reducción de la biomasa aérea y radical, disminuye la capacidad fotosintética, la conductancia estomática y finalmente se reduce el rendimiento; no obstante, este efecto varía según el genotipo^{77,78,79,80}. Esta respuesta del cultivo al estrés salino se ve incrementada si este se presenta en conjunto con algún grado de déficit hídrico^{81,82}. En términos generales, las plantas que son capaces de subsistir en un medio salino despliegan mecanismos de exclusión o acumulación de sales. Se ha observado que el amaranto responde a la salinidad a través de la acumulación y compartimentalización de sales en sus tejidos⁸², así por ejemplo, se ha observado acumulación de sodio en hojas⁷⁹.

Experiencias en Chile: Estrés salino

Con el objetivo de determinar el efecto del uso de distintos niveles de salinidad de agua de riego en el crecimiento de amaranto, aislando el efecto de estrés hídrico, se llevó a cabo un ensayo en macetas, en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (32° 40' S y 70° 32' O, 630 m.s.n.m.). Se trabajó con la variedad Amaranteca (*A. cruentus*), utilizando diferentes niveles de salinidad en el agua de riego; T1: 1,75; T2: 2,5; T3: 5; T4: 8; T5: 10 y T6: 15 dS m⁻¹, administrados desde el estado de 10 hojas en las plantas.

Al medir el potencial xilemático de las plantas, se obtuvieron valores entre -1,8 y -3,5 bares, sin observarse una tendencia clara a hacerse más negativo cuando se aumenta la concentración de sales, lo que indica que el estado hídrico de la planta no se vio afectado por los tratamientos salinos, ya que se han documentado valores para amaranto entre -1,2 y -4,0 bares en condiciones de humedad adecuada^{83,117}. A pesar de esto, la conductancia estomática se vio claramente afectada a partir de los 2,5 dS m⁻¹, observándose un promedio de 375 mmol m⁻² s⁻¹ versus los 454 mmol m⁻² s⁻¹, en la condición del control.

No se presentaron diferencias significativas en la producción de biomasa aérea ni el rendimiento de granos a medida que aumentó la salinidad, solo una disminución de estos en el tratamiento con 15 dS m⁻¹ en el agua de riego. Sin embargo, el crecimiento de raíces fue significativamente menor en los tratamientos con mayor salinidad (10 y 15 dS m⁻¹), tal como lo han observado otros estudios^{14,84} (Cuadro 12).

Cuadro 12. Respuesta de amaranto a distintos niveles de estrés salino.

Tratamiento dS m ⁻¹	B. aérea g planta ⁻¹	B-raíz g planta ⁻¹	Rendimiento g planta ⁻¹	IC
1,75	148 a	20,0 a	42,1 a	0,29 a
2,50	143 a	16,9 b	47,1 a	0,33 a
5,00	138 a	13,6 b	43,0 a	0,31 a
8,00	127 a	13,1 b	43,8 a	0,34 a
10,00	110 a	8,1 c	39,2 a	0,36 a
15,00	82 b	7,0 c	30,5 b	0,38 a

Valores con letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre medias, según la prueba de DGC (p -valor < 0,05).

Uno de los efectos más notorios del riego con agua salina en el cultivo de amaranto fue de tipo cualitativo, ya que al avanzar en la temporada las macetas regadas con 10 y 15 dS m⁻¹ fueron mostrando necrosis en sus hojas antiguas, las cuales fueron cayendo, mientras el cultivo se mantenía funcional por medio de brotación de hojas nuevas, hasta terminar la temporada (Fig. 15).



Fig. 15. Plantas de amaranto sometidas a conductividades eléctricas de 1,75 dS m⁻¹ (izquierda); 10 dS m⁻¹ (al medio) y 15 dS m⁻¹ (derecha).



7. Fecha de siembra de amaranto

**Dra. Cecilia Baginsky G.,
Dra. Paola Silva C. y
Dr. Marco Garrido S.**

Requerimientos climáticos

Uno de los manejos agronómicos más relevantes para la producción de cualquier cultivo es determinar una adecuada fecha de siembra; para ello, se deben considerar los factores ambientales requeridos por el cultivo y su efecto sobre su crecimiento y desarrollo. El objetivo final es coordinar una fecha de siembra que garantice un ambiente óptimo durante todo su ciclo, apuntando a un alto rendimiento.

Entre los factores ambientales que condicionan la fecha de siembra se encuentra la temperatura, la cual ejerce su efecto sobre el desarrollo de los cultivos. Por ello es de gran importancia conocer los requerimientos térmicos de las especies (tiempo térmico o días grados) y en función de ello, predecir fechas estimadas en que ocurrirán estados de desarrollo que pueden ser claves para la determinación del rendimiento, tales como inicio de emisión de panojas o inicio de floración en amaranto (etapas 51 y 60 según código BBCH, respectivamente). A su vez se pueden generar estrategias de manejo que permitan propiciar óptimas condiciones durante estas etapas.

Estudios llevados a cabo por diferentes autores han determinado que en promedio el amaranto requiere de al menos 120 días con temperaturas superiores a 12°C para completar su ciclo de desarrollo, considerando una temperatura umbral de 8°C^{85,59,86}. A su vez, se ha descrito que genotipos pertenecientes a *A. cruentus* requieren una mayor acumulación de días grados (tiempo térmico) para completar su ciclo de desarrollo en comparación a *A. hypochondriacus*⁸⁷.

La temperatura ideal para el desarrollo óptimo del cultivo de amaranto es de 21°C y su máxima tolerable es de 40°C^{24,29,30}; sin embargo, estos valores pueden variar según las especies cultivadas. En este sentido, al comparar *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* en dos ambientes de temperaturas promedios distintas, se observó que a una temperatura promedio de 22,4 °C, *A. hypochondriacus* obtuvo un rendimiento superior al obtenido por *A. cruentus* (1.909 y 601 kg ha⁻¹, respectivamente), en tanto que cuando la temperatura promedio fue de 27°C, *A. cruentus* obtuvo mejores resultados, con un rendimiento de 1.600 kg ha⁻¹ versus los 372 kg ha⁻¹ de *A. hypochondriacus*, demostrando con esto una mejor adaptabilidad de *A. cruentus* a climas templados cálidos, donde las temperaturas máximas en floración pueden llegar a los 40°C, mientras que *A. hypochondriacus* puede tener un mayor rendimiento en zonas con temperaturas medias máximas menores a 27°C^{60,58}.

Con respecto a la sensibilidad del cultivo de amaranto a bajas temperaturas y dado que es un cultivo originario de climas templados y tropicales¹⁰¹, las plantas no están adaptadas para tolerar heladas (temperaturas iguales o menores a 0°C), e incluso con temperaturas inferiores a 4°C, pueden verse altamente perjudicadas⁸⁸.

Existen etapas durante el ciclo de desarrollo del cultivo que requieren ciertas condiciones específicas para que ocurran de manera óptima; así, por ejemplo, para la germinación el amaranto requiere temperaturas de suelo superiores a 16°C, con las cuales logra un alto

porcentaje de germinación (sobre 80%); y además, el proceso se acelera a medida que la temperatura se incrementa (no más de 35°C). Por el contrario, cuando la temperatura del suelo es inferior a 16°C, el porcentaje de germinación se reduce significativamente, llegando incluso a valores tan bajos como 10%, cuando la temperatura de suelo es de 7°C^{29,30,89,90}.

Otra de las etapas de desarrollo del cultivo de amaranto que requieren condiciones específicas es la floración, y al ser especies sensibles al fotoperiodo, se requiere una adecuada coordinación de la fecha de siembra para asegurar una floración exitosa, en caso contrario se puede producir una floración tardía, con un menor rendimiento final o simplemente no ocurrir⁹¹. Con el fin de comprobar los posibles efectos de la fecha de siembra en el cultivo de amaranto, se realizó un experimento en Argentina⁹², evaluando fechas de siembra desde noviembre a enero. El estudio pudo corroborar el efecto de la fecha de siembra en la altura de plantas, días hasta antesis, producción de biomasa, rendimiento y el porcentaje de pérdida de plantas. Una fecha de siembra tardía, a mediados de enero, generó plantas más pequeñas, de menor producción de biomasa y granos, junto a una reducción del ciclo de desarrollo provocado por la menor cantidad de días requeridos para la floración. Además, las plantas sometidas a una fecha de siembra tardía estuvieron expuestas a una menor temperatura y longitud del día durante la fase de llenado de granos, lo que acentuó la menor producción⁹².

La disponibilidad hídrica es otro factor de gran relevancia en la determinación de la fecha de siembra, sobre todo en zonas de secano. En este caso, las siembras debieran realizarse en épocas durante las cuales la probabilidad de lluvia sea alta. Así por ejemplo, en México las lluvias se concentran durante los meses de verano por lo que el cultivo se abastece básicamente de las precipitaciones y su producción dependerá de la cantidad y distribución de las mismas durante el desarrollo del cultivo. En el caso de Chile, al contar con un clima de tipo Mediterráneo, donde las lluvias se concentran durante el invierno, es necesario recurrir al riego durante la primavera-verano, con el objeto de suplir la demanda hídrica del cultivo. Bajo estas condiciones, es común encontrar zonas en Chile donde el riego se hace escaso, principalmente durante el verano, por lo que la característica del amaranto de hacer un uso eficiente del agua dado su metabolismo de planta C₄, permite una mejor adaptación a estas condiciones climáticas⁹³.

Según estos requerimientos, el cultivo de amaranto en Chile se puede adaptar a las condiciones ambientales desde la Región de Arica y Parinacota(18°28'30"S 70°18'52"O") hasta la Región de Los Ríos(39°48'30"S 73°14'30"O) y la fecha de siembra recomendada para el cultivo podría abarcar desde el mes de octubre hasta principios de enero, dependiendo de las condiciones en cada región, considerando además que el cultivo logre completar su ciclo de desarrollo en un periodo libre de heladas^{90,94}.

Por este motivo es fundamental la elección adecuada de una fecha de siembra, dado que el estrés hídrico por la falta de lluvias puede presentarse durante el crecimiento vegetativo o la etapa reproductiva, según sean siembras tempranas o tardías, respectivamente, afectando con ello el rendimiento final del cultivo^{95,96}.

Experiencias en Chile: Fecha de siembra

Cuadro 13. Duración del ciclo de desarrollo de amaranto según fecha de siembra en Isla de Maipo (IM) y San Fernando (SF).

Ambiente	Duración ciclo días	Temp. Media °C
IM 29 sep.	159	18,13
IM 21 dic.	92	19,32
IM 17 ene.	127	16,77
SF 19 dic.	98	20,97
SF 11 ene.	113	19,17

Con el objetivo de evaluar el comportamiento de *Amaranthus cruentus* frente a cambios de fecha de siembra, se llevó a cabo un experimento en donde se analizaron cinco fechas de siembra, desde finales de septiembre a mediados de enero en dos ambientes, Isla de Maipo (IM) (33°46'35,34"S; 70°53'53,85"O; 342 m.s.n.m) y San Fernando (SF) (34°36'23,6"S; 70°58'41,6"O; 350 m.s.n.m.) para el genotipo CB-01 durante la temporada 2017-2018 (Cuadro 13).

Los resultados de este estudio mostraron que la mayor diferencia entre las fechas de siembra se presentaron en la localidad de Isla de Maipo, donde la fecha de siembra del 17 de enero, tuvo la menor producción de biomasa, un menor rendimiento, junto a un menor número de granos por metro cuadrado y una menor altura de plantas, lo cual estuvo asociado a que las plantas iniciaron su etapa reproductiva (inicio de emisión de panoja) de manera más precoz que las siembras más tempranas (42 días desde emergencia versus los 103 días en la siembra hecha el 29 de septiembre) lo que generó un menor crecimiento de las plantas, pese a que ese año las temperaturas fueron atípicamente más bajas (Cuadro 14).

En la localidad de San Fernando no se observaron diferencias en rendimiento, biomasa, altura de planta, largo de panoja ni en número de granos por m². Pese a ello, en la fecha de siembra del 19 de diciembre en San Fernando, las plantas lograron un mayor índice de cosecha (IC) y mayor peso de 1.000 granos (PMG).

Cuadro 14. Parámetros de rendimiento, crecimiento y componente de rendimiento de amaranto según fecha de siembra.

Localidad - Fecha de siembra	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	IC	Altura m	Largo panoja m	Nº granos m ⁻²	PMG g
IM-29 sep.	7.774 a	2.166 a	0,28 b	1,68 a	0,41 b	291.731 a	0,74 b
IM-21 dic.	11.238 a	2.594 a	0,23 b	2,34 a	0,37 b	322.565 a	0,81 b
IM-17 ene.	2.864 b	632 b	0,22 b	1,18 b	0,35 b	76.557 b	0,83 b
SF-19 dic.	11.072 a	3.689 a	0,33 a	1,75 a	0,58 a	413.032 a	0,90 a
SF-11 ene.	9.778 a	2.418 a	0,24 b	2,14 a	0,63 a	299.027 a	0,81 b

Letras distintas, en sentido vertical, indican diferencias estadísticas con un p-valor ≤ 0,05, con la prueba de contrastes. PMG: peso de 1.000 granos. IM: Isla de Maipo; SF: San Fernando; PMG: peso de 1.000 granos.

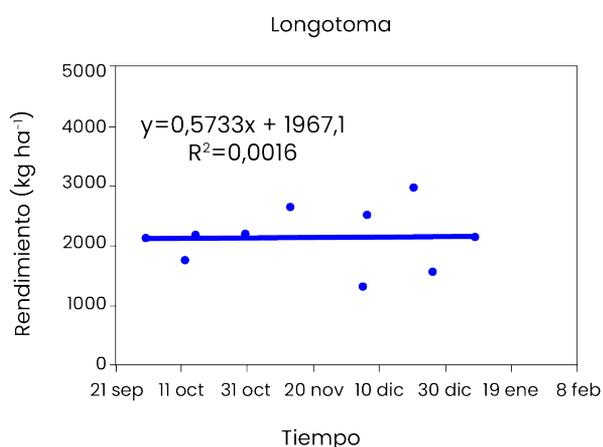
En otro estudio llevado a cabo en Chile, se evaluaron cuatro genotipos de amaranto establecidos en cinco fechas de siembra en tres localidades: Longotoma (32°18.765'S; 71°17.242'W; 92 m.s.n.m.), Alhué (34°3.357'S; 71°14.032'O; 140 m.s.n.m.) y Colbún (35°43.078'S; 71°26.655'O; 223 m.s.n.m.) durante la temporada 2018/2019 y 2019/2020 (Cuadro 15).

Los genotipos evaluados fueron: Amaranteca, CB-01 y Benito pertenecientes a *A. cruentus* y Revancha de *A. hypochondriacus*.

Los resultados indicaron que no hubo efecto de la fecha de siembra sobre el comportamiento de los genotipos; por tanto, independiente del genotipo, estos respondieron de manera similar a la fecha de siembra.

Cuadro 15. Fecha de siembra de amaranto evaluada en tres localidades.

Fecha de siembra	Longotoma	Alhué	Colbún
2018–2019			
1	12/10/2018	29/10/2018	20/11/2018
2	30/10/2018	16/11/2018	11/12/2018
3	06/12/2018	04/12/2018	27/12/2018
4	20/12/2018	18/12/2018	10/01/2019
5	08/01/2019	03/01/2019	24/01/2019
2019–2020			
1	30/09/2019	18/10/2019	29/10/2019
2	15/10/2019	21/11/2019	19/11/2019
3	13/11/2019	10/12/2019	03/12/2019
4	05/12/2019	02/01/2020	19/12/2019
5	26/12/2019	16/01/2020	09/01/2020



En el caso de Longotoma (Región de Valparaíso) las fechas de siembra donde se obtuvo cosecha de granos fluctuaron entre el 30 de septiembre y el 8 de enero, dentro de este periodo no se aprecian cambios en el rendimiento que respondan a un patrón en el tiempo, observándose un rendimiento promedio de 2.152 kg ha⁻¹, independiente de la fecha de siembra dentro de este rango (Fig. 16).

Fig. 16. Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento de amaranto en la localidad de Longotoma.

En Alhué (Región Metropolitana) las fechas de siembra fluctuaron entre el 18 de octubre y el 16 de enero. Entre el 18 de octubre y el 21 de noviembre no hay cambios estadísticamente significativos en el rendimiento, observándose un bajo valor de 1.758 kg ha⁻¹. A partir del 21 de noviembre se observa un aumento constante del rendimiento de 23,8 kg ha⁻¹ por cada día de avance hasta el 16 de enero, observándose un valor promedio de rendimiento durante la primera quincena de enero de 3.278 kg ha⁻¹ (Fig. 17).

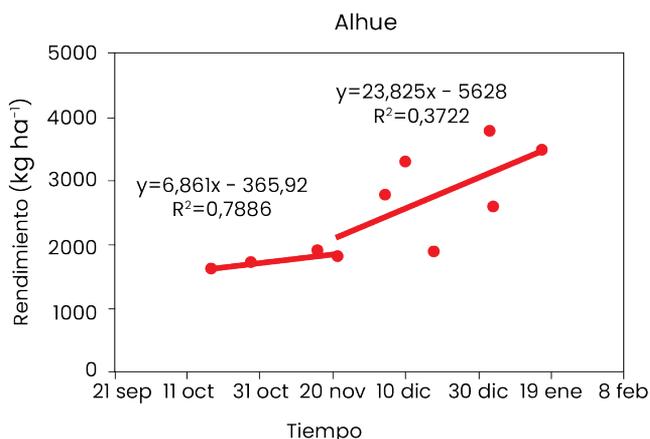


Fig. 17. Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento de amaranto en la localidad de Alhué

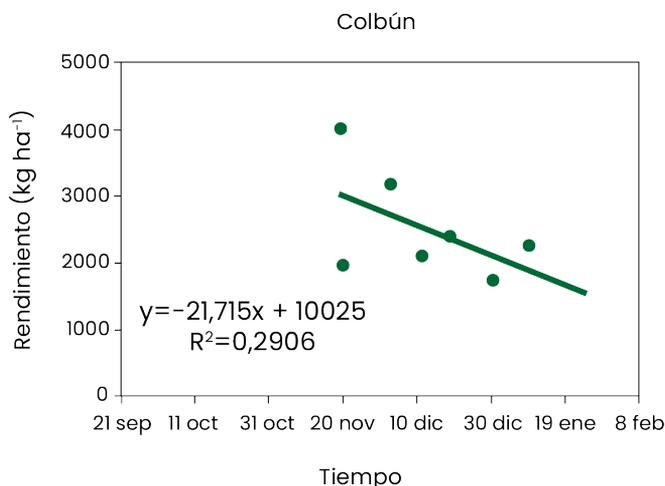


Fig. 18. Efecto de la fecha de siembra en el rendimiento de amaranto en la localidad de Colbún.

En Colbún (Región del Maule) la respuesta a la fecha de siembra fue completamente diferente. Las fechas de siembra donde se obtuvo producción de granos fluctuaron entre 29 octubre y el 9 de enero. Las bajas temperaturas presentes a partir de marzo no permitieron que las plantas maduraran y por lo tanto no fue posible medir rendimiento en las siembras realizadas los días 10 y 24 de enero.

Desde el 29 de octubre al 9 de enero se observa una reducción del rendimiento de 20,1 kg ha⁻¹ por cada día de retraso en la fecha de siembra. La fecha óptima de siembra se produjo entre 29 de octubre y el 23 de noviembre, con un rendimiento promedio de 3.105 kg ha⁻¹ (Fig. 18).

Los resultados de este estudio permiten concluir que para Longotoma, el rango óptimo de fechas de siembra es amplio, abarcando desde octubre hasta diciembre. En Alhué, por otro lado, la mejor ventana de siembra se encuentra en la primera quincena de enero, mientras que en Colbún esta ventana óptima se sitúa durante el mes de noviembre.



8. Densidad de plantas en amaranto

**Dra. Cecilia Baginsky G. y
Dra. Paola Silva C.**

Densidad de plantas y su efecto en el crecimiento y rendimiento

Uno de los factores que determina el rendimiento de los cultivos es la eficiencia con la cual una población de plantas utiliza los recursos ambientales disponibles para el crecimiento, tales como radiación, agua y nutrientes²⁸. Una de las prácticas de manejo que permite hacer un uso eficiente de los mismos es el número de plantas por unidad de superficie (densidad de plantas) y su distribución espacial (distancias entre y sobre la hilera de siembra). Con esta técnica, se procura alcanzar un punto de equilibrio entre la oferta de recursos y la competencia intraespecífica (individuos de la misma especie). En este sentido, para cada especie entran en juego las características del crecimiento de los genotipos que permitan hacer un uso más eficiente de la radiación solar, el agua y los nutrientes, además de la capacidad de compensación del crecimiento vegetativo (estructura del dosel, producción y senescencia foliar) y reproductivo (estructuras reproductivas, cuajado y llenado de granos)^{76,77}.

En general, al aumentar la densidad de plantas, aumenta la cantidad de materia seca producida por unidad de superficie, hasta llegar a un valor máximo. Esto explicaría que en ciertos cultivos exista un aumento de rendimiento al aumentar la densidad de plantas, hasta llegar a un valor máximo, para posteriormente descender o mantenerse constante⁷⁷.

El efecto que tenga la densidad de plantas sobre la producción de amaranto está directamente relacionado con la superficie expuesta a la radiación solar, afectando con ello la radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo. Al lograr coberturas vegetales altas y uniformes desde etapas tempranas en el ciclo de desarrollo del cultivo se maximizan las tasas de crecimiento gracias a una mayor interceptación²⁴.

Para este cultivo es difícil señalar una densidad óptima, ya que esta depende de muchos factores, entre ellos la especie, la variedad y las condiciones ambientales imperantes (clima, fecha de siembra, disponibilidad hídrica, entre otros), además de la interacción entre ellos⁹⁷. Junto a esto, hay que considerar la alta plasticidad fenotípica que presenta el amaranto^{98,34}, observándose que, frente a una misma densidad de plantas, el arreglo espacial en el campo (distancia entre o sobre las hileras) puede generar diferencias en el crecimiento y el rendimiento⁹⁹.

Por lo tanto, cuando se habla del amaranto y su densidad, no es sorprendente encontrar estudios altamente contradictorios; así, por ejemplo, existen aquellos en los que se consideran altas densidades a aquellas que fluctúan entre 100.000 y 250.000 plantas ha^{-1,78}, en cambio para otros autores, una alta densidad para el cultivo está sobre las 375.000 plantas ha^{-1,100}. En este caso se trata de variedades de menor crecimiento, como por ejemplo la variedad Revancha en México¹⁰¹.

Al evaluar el efecto de la densidad de plantas en el rendimiento final del cultivo sucede lo mismo, existen estudios donde se evalúan diferentes variedades y especies de amaranto, en los cuales a mayor densidad de plantas mayor es el rendimiento, debido a que existe un mayor número de panojas y mayor número de granos por metro cuadrado¹⁰². Además de esto, otros estudios demuestran lo opuesto, en donde se obtienen mayores rendimientos con densidades consideradas “bajas”, tales como las que fluctúan entre 74.000 y 173.000 plantas ha⁻¹^{103,104}. En todos los casos, los altos rendimientos están explicados por una mejor distribución de las plantas en el campo, lo que les permite un menor sombreado del dosel y por ende una mejor interceptación de radiación fotosintéticamente activa⁵⁹.

En general se recomiendan menores densidades cuando se está en condiciones de clima árido o déficit hídrico, puesto que bajo estas condiciones las plantas consumen menos agua al tener una baja cobertura^{105,97}. Otros estudios hacen alusión a la respuesta diferenciada que tienen las plantas frente a una determinada densidad en función de su ciclo de desarrollo. Así, por ejemplo, los genotipos pertenecientes a la especie de *A. cruentus* tienen un ciclo de desarrollo más corto que *A. hypochondriacus* y *A. caudatus* y por tanto acumulan menos biomasa que estos últimos¹⁰⁶ y de esta manera también toleran más altas densidades.

Finalmente, existe otro tipo de reacción de las plantas a la densidad la cual no genera ningún efecto en el rendimiento final del cultivo cuando las densidades pueden fluctuar entre 74.000 a 272.000 plantas ha⁻¹^{86,107}, lo que demuestra claramente la alta plasticidad de las especies de amaranto.

Con el fin de comprender mejor el efecto de la densidad en el cultivo de amaranto, se realizó un estudio en Austria donde se compararon dos especies, *A. hypochondriacus* y *A. cruentus*, en cinco densidades, variando desde las 80.000 a 890.000 plantas ha⁻¹¹⁰⁸. En ese estudio se concluyó que a mayores densidades se redujo el diámetro de los tallos, al igual que la altura de las plantas y el número de ramificaciones, no obstante, si bien es cierto el rendimiento se redujo entre la menor y la mayor densidad, esta reducción solo fue de un 11%. Estos mismos investigadores, al igual que otros estudios, indican que el aumento de la densidad va asociado a una menor tendedad y una mayor uniformidad en la madurez y secado de la planta y del grano, junto con facilitar la cosecha mecánica, en donde las plantas con tallos más delgados y cortos son más fáciles de cortar y procesar^{70,88,92,109,110,111}; además, se produce una mejor competencia con las malezas⁸⁶. No obstante, hay que considerar que a una mayor densidad se aumenta el gasto de semilla⁹⁶ y de mano de obra en caso de trasplante¹¹².

A pesar de la alta variabilidad en la respuesta del cultivo a la densidad, existe un componente que se mantiene constante y es la distribución de materia seca en la planta, observándose entre un 11 y 17% de materia seca destinado a hoja; entre 32 y 45% a tallo y finalmente un 45 - 50% de la materia seca destinada a estructuras reproductivas^{116,113,114,115}.

Experiencias en Chile: Densidad de Plantas

Con el objeto de evaluar la respuesta de amaranto a diferentes densidades de plantas, se llevó a cabo un ensayo, bajo condiciones de riego, en la localidad de Isla de Maipo (33°46'35,34"S; 70°53'53,85"O), en la cual se sembró el genotipo CB-01 de *Amaranthus cruentus* proveniente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Los tratamientos consistieron en tres densidades de plantas: 116.666, 166.666 y 233.333 plantas ha⁻¹ logradas con 7, 10 y 14 plantas por metro lineal (Fig. 19 y Cuadro 16) y una distancia de 0,6 m entre hileras. La siembra se realizó el 23 de octubre utilizándose una dosis de semilla 1,4 kg de semilla ha⁻¹ y una vez que las plantas emergieron se raleó para dejar la población definitiva.



Fig. 19. Arriba: plantas de amaranto separadas a 14 y 7 cm sobre la hilera de siembra (izquierda y derecha, respectivamente). Abajo: Plantas de amaranto en estado vegetativo (separadas a 7 cm.) y reproductivo (separadas a 14 cm.)

Los resultados obtenidos no evidenciaron efecto de las densidades evaluadas sobre la altura de plantas y el diámetro de los tallos, con valores promedio de 1,87 m de altura y 1,7 cm de diámetro. Tampoco se presentaron diferencias en el rendimiento de granos, biomasa total aérea ni sobre los componentes de rendimiento (número de granos m⁻² y peso de los 1.000 granos), así como tampoco en el índice de cosecha.

Cuadro 16. Producción de biomasa, rendimiento, índice de cosecha y componente de rendimiento de genotipo CB-01 según densidad de plantas.

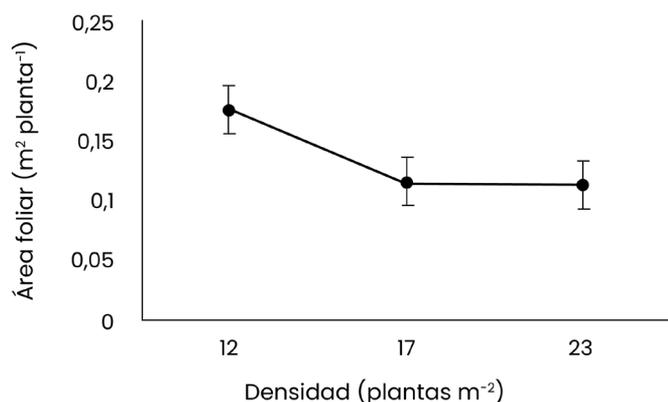
Densidad plantas ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹	PMG g	Nº granos m ⁻²	Biomasa kg ha ⁻¹	IC
116.666	5.242 a	0,79 a	670.193 a	13.765 a	0,38 a
166.666	5.416 a	0,79 a	690.713 a	14.707 a	0,38 a
233.333	5.120 a	0,76 a	670.672 a	14.526 a	0,34 a

Valores con letras iguales en sentido vertical, no difieren significativamente (p -valor $\leq 0,05$).
PMG: peso 1000 granos.

La ausencia de diferencias en rendimiento podría explicarse por la alta correlación positiva ($r=0,85$) existente entre el rendimiento y la producción de biomasa, donde tampoco se presentaron diferencias significativas entre las densidades.

Con respecto al porcentaje de distribución de la materia seca por unidad de área, no se presentaron diferencias entre tratamientos, obteniéndose valores de 12, 37 y 51% para hojas, tallos y panojas, respectivamente, coincidiendo estos resultados con la literatura existente. No obstante, cuando se evaluó la acumulación de biomasa por planta, sí se presentaron diferencias entre las densidades, lo que indicaría que ellas compensan, en parte, la falta de plantas en la sobre hilera, con un mayor crecimiento individual. Es así como la densidad más baja (116.666 plantas ha^{-1}) presentó la mayor biomasa total por planta, con valores a madurez fisiológica de 97,2 g por planta, versus 59,1 y 45,6 g por planta para las densidades mayores. Cabe destacar que estas diferencias se manifestaron solo a nivel de hojas y tallos, puesto que la biomasa de panojas por planta no se afectó por el cambio en la densidad, ni tampoco hubo diferencias en la biomasa de granos por planta.

El mayor crecimiento individual de las plantas en la menor densidad se evidenció a inicios de floración, donde la planta produjo más materia seca foliar producto de un aumento de área foliar en dicho estado fenológico (Fig. 20), lo que probablemente ayudó a compensar el IAF dado el menor número de plantas de dicha densidad. Resultados similares han sido encontrados en un estudio llevado a cabo en Argentina, donde la menor densidad (70.000 plantas ha^{-1}) generó plantas con más hojas y, por ende, mayor área foliar que aquellas más densas (230.000 plantas ha^{-1}).



Hay que destacar además que a mayor densidad se genera más sombra entre las plantas, lo que provoca una senescencia temprana de las hojas. Las plantas pueden percibir la calidad de la luz reflejada por las vecinas como un predictor preciso de la competencia futura y responder morfológicamente, incluso antes de recibir sombra directamente¹¹⁶.

Fig. 20. Efecto de la densidad de plantas en el área foliar del amaranto durante la etapa reproductiva.

Los resultados de este estudio muestran claramente que las densidades de plantas evaluadas no generaron cambios en el rendimiento obtenido, lo cual pudo deberse al estrecho rango de diferencia entre la mayor y la menor densidad evaluada (120.000 y 230.000 plantas ha^{-1}), al igual que lo observado por otros autores con densidades entre 70.000 y 270.000 plantas ha^{-1} ¹⁰⁵.

Este hecho puede obedecer a la capacidad que tiene el amaranto de compensar diferentes niveles de población de plantas debido a su morfología plástica. Por el contrario, las diferencias se hacen visibles con densidades que fluctúan entre 70.000 y 570.000 plantas ha^{-1} o entre 80.000 y 700.000 plantas ha^{-1} , donde las plantas, si bien presentan modificaciones morfológicas, estas no permiten optimizar el rendimiento¹¹⁷. Hay que destacar además que cuando las poblaciones son muy altas, muchas de las plantas mueren, llegando a la cosecha con una menor población debido a alta competencia por el espacio, luz, humedad y nutrientes^{24,98}.

Basado en estos resultados, la densidad de 116.000 plantas ha^{-1} con una distancia entre hileras de 0,60 m, podría ser la más adecuada, ya que permitiría un menor costo de semilla y existiría el espacio suficiente para facilitar el control mecánico de las malezas.





9. Fertilización en amaranto

**Dra. Cecilia Baginsky G. y
Dra. Paola Silva C.**

Uno de los factores más importantes para la vida de las plantas es la nutrición, que se refiere a un conjunto de procesos mediante los cuales los vegetales absorben, transportan y asimilan elementos químicos para ejercer funciones metabólicas, generar energía, reproducirse y crecer. Este proceso se realiza a partir de elementos minerales, los cuales son esenciales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, ya que regulan o afectan procesos fundamentales en la funcionalidad y estructura de las plantas (fotosíntesis, respiración, metabolismo, entre otros). La ausencia de estos elementos minerales genera que las plantas no logren completar su ciclo de vida; además, la función de un elemento no puede ser reemplazada por otro elemento. Dentro de los nutrientes o minerales esenciales se encuentran los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S) y los micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl y Ni); sin embargo, son los elementos primarios (N-P-K) los de mayor demanda por parte de la planta.

El nitrógeno (N) es el macroelemento más requerido por las plantas, ya que cumple roles importantes en la fisiología de los vegetales (forma parte estructural de la clorofila, proteínas, metabolismo de carbohidratos, entre otros), es altamente demandado por los cultivos, requiriéndose grandes cantidades por unidad de materia seca producida¹¹⁸. Adicionalmente, el fósforo (P) y el potasio (K) cumplen roles de gran relevancia para el metabolismo de las plantas; así, el fósforo tiene relación directa con el desarrollo de las raíces y en el aporte de energía en las plantas, mientras que el potasio influye en la formación de enzimas y síntesis de proteínas y en la regulación del potencial osmótico, lo que favorece a la economía del agua; además, está íntimamente relacionado con la formación de inflorescencias¹¹².

La nutrición de las plantas, a través de una adecuada fertilización, manejo del suelo y del agua, es un factor muy gravitante en los rendimientos; no obstante, está poco abordado por los técnicos y los productores, puesto que no solo se trata de fertilizar, sino también de preparar bien el perfil de suelo, de modo de conseguir una buena aireación para que los elementos minerales sean bien aprovechados y las raíces logren explorar un mayor perfil de suelo¹¹⁹.

Los requerimientos nutricionales del cultivo dependen de las condiciones ambientales que regularan su potencial productivo y de la fertilidad de los suelos donde ellos se cultivan. En términos generales, los factores que determinan las necesidades de fertilización son: I) la demanda del cultivo, II) el suministro de nutrientes y III) la eficiencia de fertilización.

La **demanda** de nutrientes está determinada por la especie y variedad o cultivar, por su potencial productivo o rendimiento, el que depende a su vez del agroecosistema, de la genética y del manejo agronómico. También la demanda depende de los requerimientos internos de los nutrientes, que se refiere a la concentración mínima óptima para el adecuado desarrollo del cultivo (kg de nutriente por kg de materia seca). El **suministro**, por su parte, depende del tipo y calidad del suelo, de la disponibilidad de nutrientes en el suelo y de las adiciones de nutrientes (por precipitaciones, riego y mineralización de

rastrojos); finalmente, la **eficiencia** de fertilización estará determinada por el sistema radical de las plantas, el tipo de suelo, tipo de fertilizante y forma química, la ubicación del fertilizante, la dosis y el sistema de riego¹²⁰.

Desde el punto de vista de la fertilización, son escasas las evidencias científicas rigurosas en amaranto que demuestren cuáles son los requerimientos nutricionales del cultivo y la curva de extracción de nutrientes en función de sus estados fenológicos, aspectos claves al momento de recomendar niveles de fertilización para este cultivo. Es así como, en este capítulo se recolecta información científica disponible sobre fertilización en amaranto, enfocándose principalmente en los elementos primarios y donde se ha estudiado la respuesta del cultivo frente a la fertilización inorgánica, orgánica y órgano-mineral.

En el cultivo de amaranto se ha determinado una correlación positiva entre la fertilización nitrogenada, la producción de biomasa y el rendimiento en granos, encontrándose respuesta hasta 300 kg N ha^{-1} ^{121,122,123,124}. La mayor parte de los estudios demuestran que el aumento en rendimiento de las plantas con el aumento del N se basa en un mayor número de granos por planta^{96,97,99,125}. Para la variable peso de 1.000 granos los resultados no son concluyentes, observándose aumentos en algunos casos y disminución en otros^{118,121,126}. Cabe destacar que otros estudios han demostrado que dosis altas de N pueden provocar pérdida de rendimiento, debido a un mayor crecimiento vegetativo en desmedro del reproductivo, lo que genera bajos índices de cosecha^{112,127}. Este mayor crecimiento está asociado, en parte, a la mayor altura que logran las plantas, provocando problemas de tenedura^{128,129}. Por el contrario, deficiencias de nitrógeno generan plantas con un amarillamiento temprano, retraso en el crecimiento y emergencia prematura de la panoja, lo que trae como consecuencia una baja producción¹³⁰.

Estudios llevados a cabo en *A. hypochondriacus*, determinaron una demanda de N de 86 kg ha^{-1} para obtener 1.000 kg de granos, observándose que la mayor demanda de todos los elementos fue entre los 82 y 123 días después de la siembra, periodo que coincidió con las etapas fenológicas de máximo crecimiento vegetativo, floración y llenado de grano; además 30% del N se acumuló en la inflorescencia y 20% en grano¹³¹. Otros estudios han reportado requerimientos de N entre 130 a 210 kg ha^{-1} para rendimientos de 1.400 y 3.000 kg ha^{-1} de granos¹³².

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), es un parámetro que compara la producción de granos (rendimiento) con la cantidad de nitrógeno aplicado, reportándose hasta 7,9 kg de amaranto por kg de nitrógeno¹³³; sin embargo, esta eficiencia varía en función del genotipo, las condiciones ambientales y de manejos durante el desarrollo del cultivo. En general, el amaranto se ha reportado como un cultivo relativamente ineficiente en el uso de N, principalmente debido a su bajo índice de cosecha promedio (IC = 9 y 20%, IC: relación entre el rendimiento en granos y la biomasa total producida por la planta) e índice de cosecha de N (ICN = 12–26 %; ICN: relación entre el N acumulado en el grano y el N acumulado en el granos más la paja o residuos de la cosecha).

En un estudio que evaluó dosis crecientes de N (entre 0 y 180 kg N ha⁻¹) se determinaron eficiencias en el uso del N que oscilaron entre 7,91 y 3,48 kg de grano por kg de nitrógeno aplicado, respectivamente, dependiendo de los cultivares y ambientes. Este estudio además demostró que la eficiencia del uso de nitrógeno disminuyó con el aumento de N del suelo principalmente debido a la disminución de la eficiencia de absorción de N (relación entre el N total de la planta y el N total del suelo)¹¹². Una situación similar se observó en un estudio con condiciones de secano húmedo¹¹⁷.

En general se ha observado que cuando las dosis de N son muy altas, se llega a un nivel tope en el cual las plantas continúan con la absorción de N, quedando este elemento almacenado en los tejidos y no destinado a la producción de granos, por ende, se reduce la EUN¹³⁴. Así por ejemplo, se ha observado que la extracción promedio de N por parte del amaranto fluctúa entre 70 y 135 kg de N t⁻¹ de grano^{123,133}, pudiendo llegar incluso hasta 500 kg de N t⁻¹ de grano¹³⁵ observándose que solo el 20% de N se acumula en los granos¹²³.

Con respecto al fósforo, los requerimientos de este elemento son bajos en amaranto, reportándose valores de 17 a 22 kg de P por 1.000 kg de granos producidos^{123,132} pero que solo se remueve hacia los granos entre el 26 y el 32%^{122,130}. Por ello, en un estudio llevado a cabo con la variedad *Plainsman* no se encontró efecto de la fertilización fosforada en amaranto, con rendimientos entre 754 y 1.980 kg ha⁻¹ cuando el suelo tenía 68 kg de P ha⁻¹, sin embargo, cuando la concentración de este elemento en el suelo fue de 11 kg ha⁻¹ sí hubo respuesta, concluyéndose que el rendimiento en grano aumenta en 2,81 kg por cada kg de P aplicado¹¹². Otros estudios indican valores de 337 a 388 kg ha⁻¹ de materia seca total con la extracción de 1,0 kg de P disponible^{122,136}.

Respecto del potasio, se ha determinado que se requieren 195 kg de K ha⁻¹ para producir 1.000 kg de granos de amaranto, observándose que el 57% del K absorbido se acumula en los tallos de las plantas, un 28% en la inflorescencia y solo un 3% en los granos¹²². La razón de esta respuesta puede estar asociada a que el K es importante en funciones relacionadas con la activación enzimática, neutralización de cargas negativas, en el mantenimiento de la turgencia de la planta y, por ende, para el crecimiento expansivo¹³⁷. Una parte importante de este elemento es transportado en la savia a través del xilema y se distribuyen a los tejidos de la parte aérea, entre éstos, los tallos y hojas¹³⁸. En amaranto además se ha encontrado que para producir 2.000 kg ha⁻¹ de granos, el suelo debiera tener entre 80 y 120 ppm³.

Beneficios de la aplicación de enmiendas orgánicas

Muchos de los estudios de fertilización en amaranto están relacionados con la aplicación de enmiendas orgánicas, lo que no sólo aporta macronutrientes y micronutrientes para las plantas, sino que también conlleva grandes beneficios para la calidad del suelo, ya que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas, aumentando la materia orgánica, la porosidad y la retención de agua, entre muchos otros beneficios para el suelo en el corto y largo plazo¹³⁹. Más aún, los abonos orgánicos adquieren gran importancia en la agricultura familiar campesina y en la pequeña agricultura, ya que, por lo general su uso no involucra una gran inversión económica y se pueden ocupar los residuos de los animales y los rastrojos de los vegetales.

Gran parte de los estudios en amaranto evalúan el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en conjunto con fertilizaciones inorgánicas debido a los mejores resultados logrados respecto de cada uno de ellos por separado, obteniéndose con la mezcla un mayor rendimiento y biomasa, mayor altura, mayor número y área de hojas, mayor grosor del tallo, y un aumento en la calidad nutricional del grano¹⁴⁰. Al analizar esta aplicación conjunta de fertilizantes, se concluyó que la mejor relación para la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos es de 1:3, respectivamente¹⁴¹. Estas enmiendas pueden ser variadas, entre las que destacan: vermicompost¹⁴², estiércol^{143,132,139} y compost^{144,145} observándose que los mejores resultados se han logrado con la aplicación de estiércol de vaca, en segundo lugar, el uso de compost y finalmente los resultados de una fertilización inorgánica de NPK (15:15:15)¹⁴⁶.

Otro efecto interesante de la aplicación de enmiendas orgánicas ha sido la mayor absorción de nutrientes por parte del cultivo¹⁴¹. Al analizar esto, un estudio realizado en Nigeria¹⁴⁵, determinó que la absorción óptima de N y P se dio con la aplicación de 3 t ha⁻¹ de compost + 30 kg N ha⁻¹, mientras que la mejor absorción de K se obtuvo con el tratamiento de 1,5 t ha⁻¹ de compost + 60 kg N ha⁻¹. Según los autores, la óptima combinación para la mejor respuesta del amaranto es de 3 t ha⁻¹ compost + 30 kg N ha⁻¹.

El uso de enmiendas orgánicas abre una posibilidad inherente para los pequeños agricultores de reemplazar los fertilizantes sintéticos, puesto que, a pesar de que el fertilizante inorgánico puede dar mejores resultados a corto plazo, la enmienda orgánica mejora las propiedades del suelo^{140,143} y entrega nutrientes al largo plazo¹⁴⁷. Esto junto a una menor inversión económica y al uso de productos mucho más amigable con el medio ambiente, puede generar en el mediano plazo excelentes resultados en los rendimientos, evitando contaminar el recurso suelo, tan escaso en la actualidad.

Experiencias en Chile: Fertilización

Con el objeto de evaluar la respuesta en crecimiento y rendimiento de *Amaranthus cruentus* genotipo CB-01 frente a dos niveles de fertilización nitrogenada y tres densidades de plantas (seis tratamientos), se llevó a cabo un estudio en la Estación Experimental Antumapu, dependiente de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°40' S; 70°38' O; 605 m.s.n.m.) que presenta un clima templado mediterráneo semiárido, con veranos secos y cálidos e inviernos fríos y húmedos⁶¹. El suelo es de origen aluvial de topografía plana, ligeramente profundo¹⁴⁸. Las dosis de N fueron 100 y 200 kg N ha⁻¹ en tanto que las densidades fueron 233.333; 166.000 y 116.666 plantas ha⁻¹, logradas con, 14, 10 y 7 plantas por metro lineal y una distancia entre hileras de 0,6 m.

La dosis máxima de nitrógeno se determinó según resultados del análisis de suelo, aplicándose un total de 200 kg N ha⁻¹, la cual fue parcializada, la mitad a la siembra y el resto aproximadamente 40 días después de la siembra y una vez hecho el raleo de plantas. La dosis mínima de N fue de 100 kg ha⁻¹ aplicada toda a la siembra. La dosis de fósforo fue de 100 unidades de P₂O₅, aplicada como súper fosfato triple también a la siembra^{8,149} y dado el alto nivel de K observado en el campo, se fertilizó con 40 kg de muriato de K, como dosis de mantención.

Los resultados obtenidos no mostraron interacción entre los factores (nitrógeno y densidad) para la producción de biomasa y rendimiento. Tampoco se observó efecto en el rendimiento ni en la biomasa producida (Cuadro 17).

Cuadro 17. Producción de biomasa y rendimiento de amaranto genotipo CB-01 según dosis de nitrógeno.

Dosis de N kg ha ⁻¹	Biomasa kg ha ⁻¹	Rendimiento kg ha ⁻¹
200	8.869 a	2.815 a
100	9.783 a	2.526 a

Valores con letras iguales en sentido vertical, no difieren significativamente (p -valor $\leq 0,05$).

En términos de crecimiento de las plantas, se observó que la dosis de 200 kg N ha⁻¹ provocó plantas más altas (1,96 y 1,79 m, para 100 y 200 kg N, respectivamente), pero no se diferenció estadísticamente en el diámetro del tallo (1,8 cm en promedio).

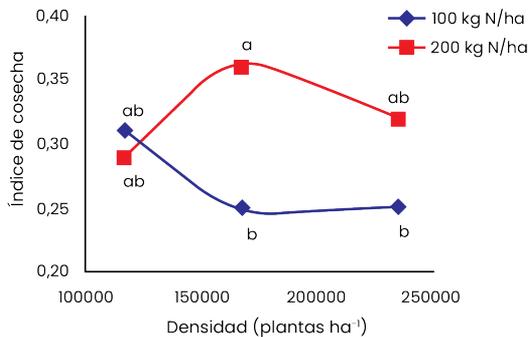


Fig. 21. Efecto de fertilización nitrogenada y densidad de plantas sobre el Índice de cosecha.

La única interacción observada entre las dosis de N y la densidad de plantas se presentó en el índice de cosecha (IC). Así a densidades bajas no se observaron diferencias en el IC con las distintas dosis de nitrógeno, posiblemente debido a la baja competencia entre plantas (Fig. 21).

Al aumentar la densidad desde 166.000 y 233.333 plantas ha⁻¹ el IC se redujo en aquellas parcelas que tuvieron una menor fertilización nitrogenada, posiblemente debido a una mayor competencia intraespecífica. Resultados similares fueron observados en un estudio donde el IC aumentó conforme la dosis de N fue más alta, a pesar de que las diferencias no fueron significativas¹⁰².

Este estudio permite concluir que, bajo las condiciones de riego de la zona central de Chile, *Amaranthus cruentus*, puede lograr rendimientos de 2.500 kg ha⁻¹, siendo 100 kg de N ha⁻¹ suficiente para maximizar este rendimiento.

Como recomendación final, es importante indicar que no existe una regla general para la fertilización del amaranto, ya que este factor depende del genotipo, de la localidad en que se cultive, disponibilidad de agua, condiciones del suelo (material parental, clase textural, materia orgánica, entre otros), así como también el manejo agronómico que se le haya dado al predio y el nivel de tecnificación existente. Cabe destacar que no siempre los niveles más altos de fertilización son los más propicios para las plantas, sobre todo cuando se trata de N, dado que excesos de este elemento pueden generar serios problemas de tenedura inhabilitándose con ello su cosecha y generando pérdidas importantes de rendimiento y lo que es más grave, un alto impacto ambiental. Es así como se recomienda que la fertilización se realice conscientemente, evaluando las condiciones de cada localidad y siempre debe ir acompañada de un estudio de suelo para conocer el aporte de nutrientes por parte del suelo. Lo ideal sería mezclar los fertilizantes en conjunto con enmiendas orgánicas, ya que estas últimas no sólo aportan nutrientes, sino que mejoran considerablemente las condiciones del suelo y pueden mantener un equilibrio ecológico; además, podrían disminuir los costos, ya que por lo general las enmiendas orgánicas pueden ser obtenidas por los mismos agricultores, a partir de los residuos orgánicos y del estiércol o guano de animales herbívoros.



Referencias

1. INDAP. 2021. Cambio climático. Modernización del Agro: Adaptación al Cambio Climático en la Agricultura Familiar Campesina. <https://www.indap.gob.cl/sites/default/files/2022-03/cambio-climatico-final.pdf>.
2. ODEPA. 2022. Estadísticas productivas nacionales. <https://www.odepa.gob.cl/>
3. Stallknecht, G. and Schulz-Schaffer, J. 1993. Amaranth rediscovered. In: New Crops. J. Janick and J. E. Simon (eds.). Wiley. New York, USA. pp:211-218.
4. Kavita, P. and Puneet, G. 2017. Rediscovering the therapeutic potential of *Amaranthus* species: A review. Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(3): 196-205.
5. Jacobsen, S., Mujica, A., Ortiz, R. 2003. La importancia de los cultivos andinos. Fermentum. Revista Venezolana de Sociología Y Antropología, 13(36): 14-24.
6. Jacobsen, S. and Mujica, A. 2003. The genetic resources of Andean grain amaranths (*Amaranthus caudatus* L., *A. cruentus* L. and *A. hypochondriacus* L.) in America. Plan Genetic Resources Newsletter, 133: 41-44.
7. Jacobsen, S. y Sherwood, S. 2002. Cultivo de granos andinos en Ecuador: Informe sobre quinua, chocho y amaranto. Quito, Ecuador: Abaya-Yala. 89p.
8. Morales, J., Vázquez, N., Bressani, R. 2014. El amaranto, características y aporte nutricional. 2^{da} ed. Trillas. México.
9. Fletcher, R. 2004. Pseudocereals, Overview. Food Science, 2: 488-493.
10. García, M., Vidal, A., Mandakovic, V., Maldonado, A., Peña, M. y Belmonte, E. 2014. Alimentos, tecnologías vegetales y paleoambiente en las aldeas formativas de la Pampa del Tamarugal, Tarapacá (ca. 900 AC-800 DC). Estudios Atacameños Arqueología y Antropología Surandinas 2014, 47, 33-55.
11. Gelotar, M., Soanki, S., Prajapati, N. 2019. Evaluation of outcrossing rate in different species of grain amaranth. The Pharma Innovation Journal, 8(12): 65-67.
12. Kigel, J. 1994. Development and ecophysiology of *Amaranthus*. In: Paredes-López O. (ed.) Amaranth Biology, Chemistry and Technology. CRC Press, Boca Raton FA. p: 40-73.
13. De la O Olán, M., Espitia, E., Rivas, P., Elías T. 2012. Propuestas y avances del diseño de un paquete tecnológico para el cultivo de amaranto en el Distrito Federal en A. V. Ayala G., G. Almaguer V., M. H. Romero G., R. López T. (coords.). Propuestas y avances del diseño de un paquete tecnológico para el cultivo de amaranto en el Distrito Federal (pp. 187-202).
14. García, J., Alejandro, G., Valdés, C., Medrano, H. 2010. El amaranto, investigación agronómica en el norte de México. Durango, México. Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. 158 p.
15. Gins, M., Gins, V., Kononkov, P. 2002. Change in the biochemical composition of amaranth leaves during selection for increased amaranthine content. Applied Biochemistry and Microbiology, 38(5): 474-479.
16. Cai, Y., Sun, M., Corke, H. 2005. Characterization and application of betalain pigments from plants of the Amaranthaceae. Trends in Food Science and Technology, 16: 370-376.
17. Tapia, M. 1997. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. 2a

- Edición. FAO, Oficina Región para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile.
18. Alejandre, G., Valdés, C. García, J. 2012. Selección y adaptación de variedades criollas de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) en el Noreste de México. In: Amaranto: Ciencia y Tecnología. Capítulo XVII. Espitia, Ed. Pag: 257-265.
 19. Sánchez, M. 1980. Potencialidad Agroindustrial del Amaranto. Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo. México, D.F. 238 p.
 20. Bojórquez, E., Velarde, A., De León, A., Jiménez, H., Pérez, J., Herrera, Espitia, E., de la Rosa, A. 2018. Morphological, proximal composition, and bioactive compounds characterization of wild and cultivated amaranth (*Amaranthus spp.*) species. *Journal of Cereal Science*, 83:222-228.
 21. Carmona, W. and Orsini, G. 2010. Synopsis of subgenus *Amaranthus* (*Amaranthus*, *Amaranthaceae*) in Venezuela. *Acta Botánica Venezuelica*, 33(2): 329-356.
 22. Arendt, E. and Zannini, E. 2013. Amaranth. In: *Cereal grains for the food and beverage industries. Food Science, Technology and Nutrition*: 439-473. <https://doi.org/10.1533/9780857098924.439>
 23. Martínez, M., Rivas, M., Vera, P., Bernal, R., Luna, S., Rosas, F. 2019. The phenological growth stages of different amaranth species grown in restricted spaces based in BBCH code. *South African Journal of Botany*, 124:436- 443
 24. Satorre, E., Benech, R., Slafer, G., De la Fuente, E., Miralles, D., Otegui, M. 2003. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. 767p.
 25. Gimlinger D. and Kaul, H. 2009. Calibration and validation of the crop growth model LINTUL for grain amaranth (*Amaranthus sp.*). *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82(2): 183-192.
 26. Grubben, G. and Denton, O. 2004. Plant resources of tropical Africa, volume 2: Vegetables. Wageningen, Netherlands: PROTA Foundation. 668p.
 27. Sawhney, S., Kohli, R., Sawhney, N. 1980. Photoperiodic studies on *Amaranthus*. *Indian Journal of Plant Physiology*, 23(2): 103-111.
 28. Satorre, E. 1999. Plant density as modifiers of growth and yield. In: E.H. Sattore and G.S. Slafer, editors, *Wheat: Ecology and physiology of yield determination*. Food Products Press, New York. p. 141-159.
 29. Ramírez, M., Carballo, A., Santacruz, A., Conde, V., Espitia, E., González, F. 2010. Distinción, homogeneidad y distribución mediante caracterización morfológica en variedades de amaranto. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3): 335-349.
 30. Rastogi, A., and Shukla, S. 2013. Amaranth: A new millennium crop of nutraceutical values. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53:109-125.
 31. Cechin, I., Prado, L., Teófilo, E., Corrêa, S., Pereira, F., de Souza, R., Ligia, A., Saldanha, L. 2022. Physiological responses of *Amaranthus cruentus* L. to drought stress under sufficient- and deficient-nitrogen conditions. *PLoS ONE* 17(7): e0270849.
 32. Mu, X. and Chen, Y. 2021. The physiological response of photosynthesis to nitrogen deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, 158, 76-82.
 33. Bassi D., Menossi, M., Mattiello, L. 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports*, 8(1):1-13.
 34. Espitia, E., Escobedo, D., Aguilar, M., Barrales, A. 2015. El amaranto una opción

- para el cambio climático y la soberanía alimentaria. In: Desarrollo y tecnología. Aportaciones a los problemas de la sociedad. Tepantlan, C., Ayala, A., Almaguer, G. Eds. 193-224 p.
35. Kadereit, G., Borsch, T., Weising, K., Freitag, H. 2003. Filogenia de Amaranthaceae y Chenopodiaceae y la evolución de la fotosíntesis C4. *International Journal of Plant Sciences*, 164:959-986.
 36. Khanam, U. and Oba, S. 2014. Phenotypic plasticity of vegetable amaranth, *Amaranthus tricolor* L. under a natural climate. *Plant Production Science*, 17: 166-172.
 37. Sarker, U. and Oba, S. 2018. Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *Amaranthus tricolor*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 186:999-1016.
 38. Grubben, G. and Van Sloten, D. 1981. Genetic resources of amaranths. A global plan of action. AGP: IBPGR 80/2. International Board for Plant Genetic Resources. Rome, Italy. p.57
 39. Espitia E., Mapes, C., Núñez, C., Escobedo, D. 2010b. Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(3): 427-437.
 40. Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F., y Fereres, E. 2009. Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa. 495p.
 41. Monteith, J. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical transactions of the royal society of London*, 281:277-329.
 42. Gallagher, J. and Biscoe, P. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science*, 91: 47-60.
 43. Maddonni, G. and Otegui, M. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48:81-87.
 44. Sinclair, T. 1988. Selecting crops and cropping systems for water. Gamon, J.A., L. Serrano, and J. Surfus. 1997. In F.D. Bidinger and C. Johansen (ed.) *Drought research priorities for the dryland tropics*, 112:492-501. Patancheru, India.
 45. Vivanco, S. 2019. Efecto de tres densidades de plantas en amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) Sobre la interceptación de radiación y crecimiento del cultivo. Memoria para optar al Título de Ingeniero Agrónomo de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. 37 p.
 46. Monsi, M. and Saeki, T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14: 22-52.
 47. Anderson, M. 1966. Stand structure and light penetration. *Journal of Applied Ecology* 3:41-54.
 48. Lang, A. 1987. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. *Agricultural Forest Meteorology*, 41:179-186. *Statistics: A biometrical approach*. McGraw-Hill, New York.
 49. Maass, J., Vose, J., Swank, W., Martinez-Yrizar, A. 1995. Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management* 74:171-180. Maddonni, G.A. and Otegui, M.E. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48:81-87.
 50. Kaul, H., Kruze, M., Aufhammer, W. 2000. Yield and radiation use efficiency of

- pseudocereals compared with oats. *Pflanzenbauwissenschaften*, 4(1): 9-14.
51. Hay, R. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Annals of Applied Biology*, 126: 197-216.
 52. Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J., Royo, C. 2000. Spectral vegetation indices as a non-destructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92:83-91.
 53. Moragues, M., García del Moral, L., Moralejo, M., Royo, C. 2006. Yield formation strategies of durum wheat landraces with distinct pattern of dispersal within the Mediterranean basin II. Biomass production and allocation. *Field Crops Research*, 95:182-193.
 54. Argomedeo, C. 2019. Crecimiento y reparto de materia seca en amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) manejado en distintas densidades de plantas. Memoria de Título, Ing. Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 37 p.
 55. Curti, R., De la Vega A., Andrade, A., Bramardi, S., Bertero, H. 2014. Multi-environmental evaluation for grain yield and its physiological determinants of quinoa genotypes across Northwest Argentina. *Field Crops Research*, 166: 46-57.
 56. De Vita P., Mastrangelo, A., Matteu, L., Mazzucotelli, E., Virzi, N., Palumbo, M., Lo Storto, M., Rizza, F., Cattivelli, L. 2010. Genetic improvement effects on yield stability in durum wheat genotypes grown in Italy. *Field Crop Research*, 119: 68-77.
 57. De la Vega, A. y De la Fuente, E. 2003. Elección de genotipos. (pp. 319-349). En: Satorre, E.; R. Benech; G. Slafer; E. De la Fuente; D. Miralles; M. Otequi. *et al.* 2003. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina: Editorial Facultad de Agronomía. 783p.
 58. García, J., Valdés, C., Olivares, E., Alvarado, O., Alejandre, G., Salazar, E., Medrano, H. 2009. Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus spp.*) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. *Phyton*, 78(1): 53-60.
 59. Espitia E., Mapes, C., Escobedo, De la O Olán, M., Rivas, P., Martínez, G., Cortés, L., Hernández, J. 2010a. Conservación y uso de los recursos genéticos de Amaranto en México. INIFAP, Centro de Investigación Regional Centro, Celaya, Guanajuato, México. 203 p.
 60. Alvarado, O., García, J., Iturbide, G., Medrano, H., Olivares, E., Valdés, C. 2004. Evaluación de genotipos de amaranto para adaptabilidad productiva en el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(1): 53-56.
 61. Santibáñez, F. y Uribe, J. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Laboratorio de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 66 p.
 62. Santibáñez, F. y Uribe, J. 1993. Atlas agroclimático de Chile: Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción. 65p.
 63. Eberhart, S. and Russell, A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1): 36-40.
 64. Flores, M. 2019. Efecto de la disponibilidad de agua en las relaciones hídricas

- de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.). Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Cs. Agronómicas, Universidad de Chile. 29p.
65. Li, Y., Li, Z., Cui, S., Chang, S. X., Jia, C., Zhang, Q. 2019. A global synthesis of the effect of water and nitrogen input on maize (*Zea mays*) yield, water productivity and nitrogen use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268: 136- 145.
 66. Mart, K., Veneklaas, E., Bramley, H. 2016. Osmotic potential at full turgor: an easily measurable trait to help breeders select for drought tolerance in wheat. *Plant Breeding*, 135(3): 279–285.
 67. Farooq, M., Hussain, M., Siddique, K. 2014. Drought stress in wheat during flowering and grain-filling Periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33(4): 331–349.
 68. Bartlett, M., Zhang, Y., Kreidler, N., Sun, S., Ardy, R., Cao, K., Sack, L. 2014. Global analysis of plasticity in turgor loss point, a key drought tolerance trait. *Ecology Letters*, 17(12): 1580–1590.
 69. Ghoulam, C., Foursy, A., Fares, K. 2002. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 47(1): 39–50.
 70. Omami, E. and Hammes, P. 2006. Interactive effects of salinity and water stress on growth, leaf water relations, and gas exchange in amaranth (*Amaranthus spp.*). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 34(1): 33–44
 71. Isayenkov, S. and Maathuis, F. 2019. Plant Salinity Stress: Many Unanswered Questions Remain. *Front. Plant Science*, 10 (80): 11 p.
 72. Romero-Aranda, R., Soria, T., Cuartero, J. 2001. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*, 160(2): 265–272.
 73. Goharrizi, K, Hamblin, M., Karami, S., Nazari, M. 2021. Physiological, biochemical, and metabolic responses of abiotic plant stress: Salinity and drought. *Turk. J. Bot.*, 45 (Suppl. S1): 623–642.
 74. Giordano, M., Petropoulos, S., Roupheal, Y. 2021. Response and defence mechanisms of vegetable crops against drought, heat and salinity stress. *Agriculture*, 11(463): 30 p.
 75. Liu, F. and Stutzel, H. 2002. Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus spp.*) in response to soil drying. *European Journal of Agronomy*, 16: 137–50.
 76. Omami, E. 2005. Response of Amaranth to salinity stress. Ph. D. Horticulture Thesis. Department of Plant Production and Soil Science, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of Pretoria. 235 p. Oster, J. 1994. Irrigation with poor quality water. *Agricultural Water Management*. 25: 271–297.
 77. Alves, D., Souza, H., Ribeiro, S., Holanda, E. 2008. Crescimento e desenvolvimento do Amarantho (*Amaranthus spp.*) sob estresse salino e cobertura morta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 43–48.
 78. Omami, E., Hammes, P., Robbertse, P. 2006. Differences in salinity tolerance for growth and water-use efficiency in some amaranth (*Amaranthus spp.*) genotypes. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 34(1): 11–22.
 79. Youssfi, L., Choukr, R., Hirich, A. 2012. Effect of treated wastewater use on three varieties

- of amaranth (*Amaranthus spp.*) under semi-arid conditions. World Academy of Science, Engineering and Technology, 62: 147-152.
80. Quispe, H. y Jacobsen, S. 1999. Tolerancia de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) a la salinidad. In: Jacobsen y Valdez (eds.) Libro de Resúmenes: Primer Taller Internacional sobre Quinoa – Recursos Genéticos y Sistemas de Producción, Lima, Peru. 457 p.
 81. Lavini A, Pulvento C, d'Andria R, Riccardi M. 2015. Effects of saline irrigation on yield and qualitative characterization of seed of an amaranth accession grown under Mediterranean conditions. Journal Agricultural Science, 154(5):858-869.
 82. Jacobsen, S., Jensen, C., Liu, F. 2012. Improving crop production in the arid Mediterranean climate. Field Crops Research, 128: 34-47.
 83. Olufolaji, A., Odeleye, F., Ojo, O. 2010. Effect of soil moisture stress on the emergence, establishment and productivity of *Amaranthus* (*Amaranthus cruentus* L.). Agriculture and Biology Journal of North America, 1(6): 1169-1181.
 84. Jung, J., and McCouch, S. 2013. Getting to the roots of it: Genetic and hormonal control of root architecture. Front Plant Science, 4:186.
 85. Falasca, S., Pitta, S., Bernabé, M. 2014. Agroclimatic Zoning for Amaranth (*Amaranthus caudatus*) Using a Geographical Information System in Argentina. Journal of Geography, Environment and Earth Science International, 1(1):9-23.
 86. Das, S. 2016. *Amaranthus*: A Promising Crop of Future. Department of Botany Taki Government College West Bengal, India. Sprinker Science. 208 p.
 87. García, J., Aviña, G., Rubio, R., Medina, R., Alvarado, O., Alejandre, G. 2016. Requerimiento de unidades de calor en el cultivo del amaranto. Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan, 5(7): 1411-1421.
 88. Corke, H. and Cai, Y. 2016. The legumes and pseudocereals. Amaranth: Overview. Hubei University of Technology, Wuhan, China; University of Hong Kong, Hong Kong, China.
 89. Aufhammer, W., Czuczorova, D., Kaul, H., and Kruse, M. 1998. Germination of grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* x *A. hybridus*): effects of seed quality, temperature, light, and pesticides. European Journal of Agronomy, 8: 127-135.
 90. Bavec, F and Mlakar, S. 2002. Effects of soil and climatic conditions on emergence of grain amaranths. European Journal of Agronomy, 17: 93-103.
 91. Casini, P. and La Rocca, F. 2014. *Amaranthus cruentus* L. is suitable for cultivation in Central Italy: field evaluation and response to plant densities. Italian Journal of Agronomy, 9(4): 166-175.
 92. Roiani, R., Sánchez, T., Reinaudi, N., De Ferramola, L. 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.
 93. Mlakar, S., Bavec, M., Jakop, M., 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.
 94. Mujica, A., Berti, M., Izquierdo, J. 1997. [En línea]. El cultivo del amaranto (*Amaranthus*

- spp.): producción, mejoramiento genético y utilización. Universidad Nacional del Altiplano, Perú; Universidad de Concepción, Chile y Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
95. González, T. y Rojo, H. 2005. Prontuario de Agricultura. Cultivos Agrícolas. Editorial Grupo Mundi-Prensa. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Madrid, España. 154 p.
 96. Tavitas, F. y Hernández, A. 2012. Manual de la producción química y orgánica del cultivo de amaranto en el estado de Morelos. INIFAP. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Zacatepec. Zacatepec, Morelos, México. Folleto Técnico 63. 58 p.
 97. Ramírez, M., Espitia, E., Carballo, A., Zepeda, R., Vaquera, H., y Córdova, L. 2011. Fertilización y densidad de plantas en variedades de Amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 2(6): 855- 866.
 98. Espitia, R. 1994. Breeding of grain amaranth. En: Paredes López, O. (ed.). Amaranth biology, chemistry and technology. CRC Press, Boca Raton, Fl. USA. pp. 23-28.
 99. Apaza, G., Romero, S., Guillen, P., Baltensperguer, D. 2002. Response of grain amaranth production to density and fertilization in Tarija, Bolivia. En: J. Janick and A. Whipkey (eds.). Trends in new crops and new uses. ASHS Press. Alexandria, VA, USA.
 100. Torres, S., Trinidad, S., Reyna, T., Castillo, J., Escalante, E., León, G. 2006. Respuesta de genotipos de amaranto a densidades de población. Revista Fitotecnia Mexicana, 29: 307-312.
 101. Estrada, L. y Sahagún, C. 2001. Guía para cultivar amaranto en el distrito federal. Folleto para Productores N° 1. SAGARPA, INIFAP, CIR-CENTRO. CEVAMEX, Chapingo, Estado de México. 16 p.
 102. Díaz-Ortega, A., Escalante, J., Trinidad, A., Sánchez, P., Mapes, C., Martínez, D. 2003. Rendimiento, eficiencia agronómica del nitrógeno y eficiencia en el uso del agua en amaranto en función del manejo del cultivo. Terra Latinoamericana, 22: 109-116.
 103. Henderson, T., Johnson, B., Schneiter, A. 1998. Grain amaranth seeding date in the Northern Great Plains. Agronomy Journal, 90: 339-344.
 104. Henderson, T., Schneiter, A., Riveland, N. 1993. Row spacing and population effects on yield of grain amaranth in North Dakota. pp. 219-221. In: Janick, J. and J.E. Simon (eds.). New crops. Wiley. New York.
 105. Henderson, T., Johnson, B., Schneiter, A. 2000. Row spacing, plant population, and cultivar effects on grain amaranth in the Northern Great Plains. Agronomy Journal, 92: 329-336.
 106. Rivelli, A., Gherbin, P., De Maria, S., Pizza, S. 2008. Field evaluation of *Amaranthus species* for seed and biomass yields in southern Italy. Italian Journal of Agronomy, 3: 225-229.
 107. Baginsky, C., Figueroa, V., González, A., Silva, P. 2014. Efecto de la densidad de plantas y la fertilización nitrogenada en *Amaranthus cruentus* L. bajo condiciones de clima mediterráneo. Procceding Congreso Nacional del Amaranto. Pasado, presente y futuro. Universidad Autónoma Chapingo, 28 al 30 de agosto, México. 153-162.

108. Gimplinger, D., Schulte, E., Dobos, G., Kaul, H. 2008. Optimum crop densities for potential yield and harvestable yield of grain amaranth are conflicting. *European Journal of Agronomy*, 28: 119-125.
109. Hauptli, H. and Jain, S. 1978. Biosystematics and agronomic potential of some weedy and cultivated amaranths. *Theoretical and Applied Genetics*, 52: 177-185.
110. Espitia, E. 1992. Razas mexicanas de amaranto. XIV Congreso Nacional de Fitogenética. Tuxtla Gutiérrez, Chis. México. 669 p.
111. Romero, C., Ocampo, J., Sandoval, E., Navarro, H., Franco, O. 2021. Densidades de siembra y dosis de fertilización en el cultivo de amaranto. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5): 937-944.
112. Alejandre, I. y Gómez, F. 1986. Cultivo del amaranto en México. Colección de Cuadernos Universitarios. Serie Agronomía N° 12. Universidad Autónoma de Chapingo, México. 245 p.
113. Matteucci, S. 1998. Potencial productivo del amaranto en la pampa ondulada, Argentina: comportamiento de seis germoplasmas. *Revista de la Facultad de Agronomía – LUZ*, 15: 560 – 570.
114. Mapes, C., Díaz, A., Collazo, A., Bye, R. 1995. Desarrollo de cinco razas de amaranto (*Amaranthus spp.*) en Chalco, estado de México. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*. 66(2): 149- 169.
115. Monroy, D., Martínez, J., Gavi, F., Torres, M., Hernández, I. 2021. Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en dos variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus*) bajo fertigración. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 23(3): 14-21.
116. Schmitt, J. and Wulff, R. 1993. Light spectral quality, phytochrome and plant competition. *Trends in Ecology and Evolution*, 8(2):47- 51.
117. Zubillaga, M., Camina, R., Oriko, G., Failla, M., Barrio, M. 2020. Amaranth in southernmost latitudes: plant density under irrigation in Patagonia, Argentina. *Rev. Ceres Viçosa*, 67(2): 93-99.
118. Marschner, P. 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Third Edition. Elsevier. San Diego, CA, USA. 651 p.
119. Faiguenbaum, H. 2017. El cultivo del maíz. ISBN. 978-956-09012-0-0. Pag: 40 – 60.
120. Rodríguez, J., Pinochet, D., Matus, F. 2001. Fertilización de los cultivos. LOM Ediciones. Santiago-Talca-Valdivia, Chile. 117 p.
121. Sepúlveda, H. 1989. Quinoa y amaranto: dos pseudocereales con gran perspectiva. *El Campesino*, 120(10): 970.
122. Elbehri, A., Putnam, D., Schmitt, M. 1993. Nitrogen fertilizer and cultivar effects on yield and nitrogen-use efficiency of grain amaranth. *Agronomy Journal*, 85: 120-128.
123. Clark, K. and Myers, R. 1994. Intercrop performance of pearl millet, amaranth, cowpea, soybean and guar in response to planting pattern and nitrogen fertilization. *Agronomy Journal*, 86: 1097-1102.
124. Hevia, F., Wilckens, R., Berti, M., Millán, M. 2000. Fertilización nitrogenada en amaranto (*Amaranthus sp*): contenido de proteína y algunas características del almidón en su semilla. *Agro-Ciencia*, 16(2): 153-162.

125. Brambilla, T., Brambilla, A., e D'Oliveira, P. 2008. Efeito da adubação nitrogenada na produção de amaranto Influence of nitrogen fertilization on yield of amaranth. *Semina: Ciências Agrárias*, 29(4): 761-768.
126. Myers, R. 1998. Nitrogen fertilizer effect on grain amaranth. *Agronomy Journal*, 90(5): 597-602.
127. Skwarylo-Bednarz, B., Brodowska, M., Brodowski, R. 2011. Evaluating the influence of varied NPK fertilization on yielding and microelements contents at amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) depending on its cultivar and plant spacing. *ACTA Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 10(4): 245-261.
128. Arellano, J. and Galicia, J. 2007. Yield and plant and panicle traits in amaranth in response to nitrogen and seeding rate. *Agricultura Técnica en México*, 33: 251-258.
129. Olaniyi, J., Adelasoye, K., Jegede, C. 2008. Influence of nitrogen fertilizer on the growth, yield and quality of grain amaranth varieties. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4: 506-513.
130. Estrada, L. y 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. 16 p 153.
131. González, L., Moreno, E., Espitia, E., Ayala, A. 2022. Extracción nutrimental del amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) variedad Nutrisol. *Revista Fitotecnia*, 45(3): 313-322.
132. Aufhammer W., Kaul, H., Herz, P., Nalborczyk, E., Dalbiak, A., Gontarczyk, M. 1995. Grain yield formation and nitrogen uptake of amaranth. *European Journal of Agronomy* 4:379-386, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(14\)80039-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(14)80039-7).
133. Ruiz-Corral, J., Medina G., González, I., Flores, H., Ramírez, G. Ortiz, C., Byerly, K., Martínez R. 2013. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Segunda Edición. INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564 p.
134. Herrera, J. 1998. Fertilización nitrogenada en amaranto (*Amaranthus spp. var. Plainsman*). Tesis para el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Chillán, Chile. 30 p.
135. Basantes M. y Terán, D. 2017. Efecto de la fertilización nitrogenada en el contenido proteico y pigmentos de amaranto (*Amaranthus caudatus* L.) *Vínculos-ESPE* 2:35-42.
136. Pandey C., Kumar, Y., Maheshwari, D., Rawat, D., Prabha, D. 2018. Potential of native cold tolerant plant growth promoting bacilli to enhance nutrient use efficiency and yield of *Amaranthus hypochondriacus*. *Plant and Soil*, 428:307-320.
137. Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumager Moller, I., White, P. 2012. Functions of macronutrients. in: Marschner, P. (ed.) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*, 3rd ed Academic Press Amsterdam, Netherlands. pp. 135-189.
138. Ahmad, I. and Maathuis, F. 2014. Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of Plant Physiology*, 171:708-714.

139. EPA (Environmental Protection Agency). 2007. The Use of Soil Amendments for Remediation, Revitalization and Reuse. U.S.A. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation (OSRTI). Solid Waste and Emergency Response (5208P) EPA 542-R-07-013. 52 p.
140. Chechet, K., and Charles U. 2019. Effects of different types of organic fertilizers on the nutrients and anti-nutrients composition of *Amaranthus caudatus* and *Amaranthus cruentus*. Asian Research Journal of Agriculture 11(1): 1-13.
141. Lian, H., Ouyang, L., Liu, J., Yang, L. and Zou, P. 2017. Effects of different proportions of inorganic fertilizer and organic fertilizer on yield and quality of amaranth. 6th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2017). Advances in Engineering Research, 129: 911-915.
142. IAlam, M., Jahan, M., Ali, M., Islam, M., Khandaker, S. 2007. Effect of vermicompost and NPKS fertilizers on growth, yield and yield components of red amaranth. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 1(4): 706-716.
143. Love, J. and Nyankanga, R. 2018. Response of growth and grain yield of amaranth (*A. hypochondriacus*) to combined manure and inorganic fertilizer pellets and non-pellets. International Journal of Plant and Soil Science, 24(3): 1-10.
144. Olowoake, A., and Ojo, J. 2014. Effect of fertilizer types on the growth and yield of *Amaranthus caudatus* in Ilorin, southern Guinea, savanna zone of Nigeria. Advances in Agriculture, 1-5 p.
145. Romero, C., Ocampo, J., Sandoval, E., Navarro, H., Franco, O., y Calderón, F. 2017. Fertilización orgánica-mineral del cultivo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(8): 1759- 1771.
146. Sanni, K. 2016. Effect of compost, cow dung and NPK 15-15-15 fertilizer on growth and yield performance of Amaranth (*Amaranthus hybridus*). International Journal of Advanced Science Research, 2: 76-82.
147. Maerere, A., Kimbi, G., Nonga, D. 2001. Comparative effectiveness of animal manures on soil chemical properties, yield and root growth of Amaranthus (*Amaranthus cruentus* L.). African Journal of Science and Technology 1(4):14-21.
148. CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio Agrológico de la Región Metropolitana. Publicación 115, Fondo de Desarrollo e Innovación. Santiago, Chile. 425 p.
149. INIA. 1987. Informe de Avances de Investigación del Programa Nacional de Cultivos Andinos, 1986-87. Lima, Perú.
150. Ufoegbune, G., Adebisi, G., Adekunle, A. 2016. Determination of water use of three vegetables; *Amaranthus* (*Amaranthus cruentus*), Jutemallo (*Corchorus olitorius*) and Celosia (*Celosia argentea*) at Abeokuta, Nigeria. Journal of Environmental and Analytical Toxicology, 6(3): 2-5.





UNIVERSIDAD DE CHILE

Amaranto: Principios y experiencias para su cultivo en Chile



Cecilia Baginsky G.
Paola Silva C.
Marco Garrido S.

Más información:
cbaginsk@uchile.cl