

Amaranto agroecológico: Resiliencia, eficiencia y potencial biotecnológico frente al cambio climático

Agroecological amaranth: resilience, efficiency, and biotechnological potential in the face of climate change

Iskra Mariana Becerra-Chiron¹ , Leslie Becerril-Serna^{2*} 

¹ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Departamento de Botánica y Zoológia, cam. Ramón Padilla Sánchez 2100, 44600, Las Agujas, Jalisco, México.

² Universidad del Valle de Atemajac, Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Base Científica, Av. Tepeyac 4800, 45050, Jalisco, México.

*Autor para correspondencia: leslie.becerril@univa.mx

Fecha de recepción:

4 de agosto de 2025

Fecha de aceptación:

9 de octubre de 2025

Disponible en línea:

23 de enero de 2026

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-
NoComercial-
CompartirIgual 4.0
Internacional
(CC BY-NC-SA 4.0)

Cómo citar:

Becerra-Chiron, I. M., & Becerril-Serna, L. (2025). Amaranto agroecológico: Resiliencia, eficiencia y potencial biotecnológico frente al cambio climático. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 12, e0121001. <https://doi.org/10.30973/aap/2026.12.0121001>

RESUMEN

El género *Amaranthus*, con más de 2,500 especies en zonas tropicales, ha sido apreciado por su valor nutricional. Asimismo, su potencial agroecológico y biotecnológico sigue subutilizado. Esta revisión analiza su resiliencia y eficiencia en sistemas agrícolas sostenibles ante el cambio climático, además de su interacción tri-trófica, defensas ante herbívoros y valorización de subproductos. Mediante una revisión sin restricción temporal, se contextualiza su importancia histórica. En conclusión, el amaranto es un cultivo estratégico por su versatilidad y adaptabilidad.

PALABRAS CLAVE

Amaranthaceae, agroecología, subproductos agrícolas.

ABSTRACT

The genus *Amaranthus*, comprising more than 2,500 species in tropical regions, has long been valued for its nutritional importance. Furthermore, its agroecological and biotechnological potential remains underutilized. This review analyzes its resilience and efficiency in sustainable agricultural systems under climate change, as well as its tri-trophic interactions, defenses against herbivores, and the valorization of by-products. Through an unrestricted temporal literature review, its historical relevance is contextualized. In conclusion, amaranth is a strategic crop due to its versatility and adaptability.

KEYWORDS

Amaranthaceae, agroecology, agricultural by-products.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye una de las mayores amenazas para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la seguridad alimentaria global. Este fenómeno, intensificado por actividades antropogénicas, ha generado un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, alteraciones en los patrones de precipitación, incremento en la frecuencia de eventos climáticos extremos y elevación sostenida de las temperaturas medias (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022; Rockström et al., 2021). Como consecuencia, la productividad y estabilidad de cultivos tradicionales se ha visto comprometida, particularmente en regiones vulnerables (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021). El amaranto (*Amaranthus* spp.), perteneciente a la familia Amaranthaceae, emerge como un cultivo estratégico por su plasticidad ecológica, su historia agrícola milenaria y sus propiedades agro-nómicas y nutricionales. Su profundo valor cultural en México, cultivado desde la época prehispánica por Mexicas y Mayas, en donde formaba parte de rituales y tradiciones. Actualmente, su consumo en México es especialmente en forma de “alegría” (dulce tradicional de semilla reventada de amaranto), y que refleja la continuidad de este legado cultural. El género *Amaranthus* cuenta con más de 60 especies distribuidas globalmente, es capaz de crecer en suelos marginales, tolerar amplios rangos de pH, resistir estrés hídrico y altas temperaturas, y mostrar resistencia natural a plagas y enfermedades (Jacobsen y Sherwood, 2002; Shukla et al., 2010).

Desde un enfoque integrador, la agroecología propone principios clave para transitar hacia sistemas agrícolas resilientes y sostenibles. Entre los 10 elementos establecidos por la FAO (2018), destacan la resiliencia y la eficiencia. La resiliencia es definida como la capacidad de los agroecosistemas para resistir y recuperarse ante alteraciones, y la eficiencia, entendida como la optimización de la producción con mínimo uso de insumos externos a través de procesos biológicos sostenibles, representan pilares fundamentales de la agricultura sostenible. En el caso del amaranto, su resiliencia se manifiesta en su adaptabilidad edafoclimática, tolerancia al estrés biótico y abiótico, además de su comportamiento favorable en

cultivos intercalados o diversificados. Su eficiencia, por otra parte, se evidencia en sistemas productivos con alta rentabilidad y bajo uso de agroquímicos, alineados con prácticas agroecológicas.

Pese a su importancia histórica y su alto valor funcional, el amaranto continúa siendo un cultivo subutilizado. Desde la época precolombina, sufrió de una prohibición colonial histórica que dio como resultado la pérdida de conocimiento tradicional durante cientos de años (Stallknecht y Schulz-Schaeffer, 1993). Actualmente, existen barreras estructurales contemporáneas como sistemas agroindustriales dominantes, falta de apoyo institucional, deficiencia de mercado y reducción de áreas de producción en México, así como una escasa integración de políticas agrícolas estratégicas (Espitia-Rangel et al., 2020); también, por sus características organolépticas neutras, no suele ser atractivo en la práctica culinaria. Más allá de sus cualidades nutricionales, el amaranto ofrece atributos ecológicos, fisiológicos y bioquímicos que ameritan una revalorización desde perspectivas interdisciplinarias. Ha demostrado ser una alternativa socioeconómica viable para las comunidades rurales mexicanas, particularmente en contextos de agricultura campesina. En Tochimilco, Puebla, principal municipio productor a nivel nacional, el amaranto representa una opción económica que contribuye significativamente al ingreso de las unidades de producción familiar, con una rentabilidad positiva independientemente del tipo de manejo empleado, donde el costo de producción del ciclo agrícola es absorbido por seis de las diez cargas promedio que obtienen los productores. La importancia económica del cultivo se refleja en que la superficie destinada al amaranto en los últimos veintiocho años se ha incrementado a una tasa media anual de 9.82 %, lo que evidencia su creciente adopción como estrategia de diversificación productiva ante las limitaciones de los cultivos tradicionales. Además, esta actividad agroindustrial no solo representa importancia económica para la localidad y comunidades vecinas al participar familias enteras, sino que también genera un elevado sentido de pertenencia y cohesión social entre los habitantes (Sánchez-Olarte et al., 2015).

Por lo tanto, el objetivo de la presente revisión fue analizar cómo los atributos de resiliencia y eficiencia del *Amaranthus* spp. contribuyen a la

sostenibilidad agrícola frente al cambio climático. Asimismo, se abordan sus interacciones ecológicas, mecanismos defensivos frente a herbívoros, y el aprovechamiento biotecnológico de sus subproductos, consolidando su perfil como cultivo clave para el futuro agroalimentario.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura siguiendo un protocolo de inclusión y exclusión orientados a recuperar información relevante sobre los atributos agroecológicos y biotecnológicos del amaranto (*Amaranthus spp.*). Aunque no se impuso una restricción temporal estricta, se priorizó la literatura científica publicada en los últimos 10 años para el análisis crítico, dada su mayor relevancia metodológica, conceptual y tecnológica. Además, se integró también evidencia histórica significativa con el fin de contextualizar adecuadamente la evolución del conocimiento en torno al cultivo de amaranto. Se consideró como métrica de relevancia la información que se alinee al enfoque de la revisión, así como las categorías de tipo de estudio, idioma, año de publicación y disponibilidad del documento (Cuadro 1).

Cuadro 1. Criterios de inclusión y exclusión para la búsqueda de información.

Categoría	Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Tipo de estudio	Ensayos clínicos, estudios observacionales, revisiones sistemáticas, artículos científicos, tesis de postgrado, capítulos de libros, páginas web.	Cartas al editor, editoriales, resúmenes de congresos, estudios de caso.
Idioma	Inglés y español.	Artículos en otros idiomas.
Año de publicación	Sin restricción temporal, sin embargo, se priorizaron documentos entre 2015 y 2025.	
Disponibilidad	Texto completo disponible.	Solo resumen o sin acceso al texto completo.

La estrategia de búsqueda contempló el uso de palabras clave como: cambio climático, interacciones tri-tróficas, resiliencia, cultivo, *Amaranthus spp.*, biotecnología agrícola, entre otras asociadas. Se consultaron diversas bases de datos académicas y científicas, incluyendo Web of Science, Google Scholar, Elsevier, Springer Link, Redalyc, además del portal del Consorcio Nacional de Recursos de Información científica y Tecnológica para la búsqueda de literatura relevante. Para la gestión, organización y depuración de referencias bibliográficas se utilizó el software EndNote (Clarivate, 2023).

La selección y análisis de la literatura fue realizada de forma independiente por ambas autoras. Posteriormente, se discutió en conjunto la pertinencia, profundidad y relevancia de los documentos seleccionados, garantizando una curaduría crítica de las fuentes que sustentan la estructura temática y argumentativa del presente artículo.

Amaranthus spp. y el cambio climático: fisiología, historia y adaptación

El cambio climático ha pasado de ser una proyección científica a una realidad observable que afecta directamente la agricultura. Sus manifestaciones como las alteraciones térmicas, la variabilidad en los patrones de lluvia, la intensificación de eventos extremos y el aumento de gases de efecto invernadero impactan negativamente la fisiología vegetal, reduciendo la germinación, el crecimiento y la productividad de los cultivos, lo que compromete la seguridad alimentaria global.

Frente a este panorama, el *Amaranthus spp.* constituye una alternativa agronómica estratégica por su excepcional capacidad de adaptación a condiciones climáticas y edafológicas adversas. Diversos estudios han demostrado que el amaranto es capaz de tolerar el estrés hídrico. La exposición a restricciones de agua incrementa significativamente la concentración de prolina, un osmoprotectante que actúa como amortiguador redox con propiedades antioxidantes, ayudando a la planta a mantener su maquinaria fotosintética esencial para el crecimiento reproductivo. Este mecanismo se basa principalmente en la capacidad de la planta para ajustar la osmolaridad celular mediante la acumulación de prolina y azúcares solubles, lo que preserva la turgencia foliar incluso

en períodos de sequía. Además, el amaranto puede crecer en suelos degradados o de baja fertilidad, mostrando una excelente capacidad de adaptación a temperaturas elevadas (Egea et al., 2023; Mendoza Hernández, 2011; Seleiman et al., 2021; Vargas-Ortiz et al., 2021). Desde el punto de vista nutricional, el amaranto destaca por su alta concentración de proteínas y aminoácidos esenciales, lo cual lo posiciona como un alimento funcional valioso, especialmente en contextos de vulnerabilidad nutricional (Orona-Tamayo y Paredes-Lopez, 2024). Esta cualidad refuerza su inclusión en sistemas agrícolas diversificados que están orientados a la sostenibilidad y la resiliencia climática.

En México, la relación del amaranto con el entorno y la cultura es profunda. Evidencias arqueobotánicas encontradas en las cuevas de Coxcatlán, Puebla, sugieren su cultivo desde hace más de 5,000 años. Semillas de *A. cruentus* L. datadas entre 5,200 y 3,400 a. C. fueron halladas en condiciones de conservación excepcionales, atribuibles al almacenamiento en ollas de barro y condiciones de humedad estable (MacNeish, 1964; Mapes-Sánchez y Espitia-Rangel, 2009).

Fisiológicamente, el amaranto presenta una ventaja adaptativa por su metabolismo fotosintético C4, el cual permite una mayor eficiencia en la fijación de carbono y en el uso del agua. A diferencia de plantas C3 como el maíz o el trigo, las especies de *Amaranthus* no realizan fotorrespiración y sintetizan ácidos orgánicos de cuatro carbonos como primer producto fotosintético, lo que optimiza la formación de biomasa en ambientes cálidos y secos (Siadjeu et al., 2021).

Estudios recientes en regiones de México como los Altos de Chiapas han documentado que prácticas agroecológicas como rotación de cultivos, fertilización orgánica y diversificación mejoran significativamente la resiliencia del sistema productivo del amaranto, reduciendo su vulnerabilidad ante el cambio climático y el mercado (Mejía-Valvas et al., 2021).

La adaptación térmica del amaranto varía entre especies: *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* L. se desarrollan eficientemente entre los 16 °C y 35 °C, mientras que *A. caudatus* L. ha demostrado mayor tolerancia a heladas, lo cual amplía su rango de cultivo en zonas templadas (Bari y Alfaki, 2023; Modi, 2007).

En países como Taiwán, el amaranto es uno de los pocos cultivos viables bajo condiciones extremas

en invernaderos que alcanzan hasta 40 °C (Wang y Ebert, 2012). En Rusia, su potencial está siendo explorado a través de herramientas de ingeniería genética, orientadas a mejorar la producción de hoja y semilla (Kuluev et al., 2017).

En el caso de México, se han realizado modelaciones sobre la migración potencial y las zonas óptimas de cultivo de *A. cruentus* y *A. hypochondriacus*, además de sus parientes silvestres *A. hybridus* L. y *A. powellii* S. Watson, demostrando diferencias significativas en los patrones de adaptación, principalmente determinados por la temperatura y la precipitación (Cechin et al., Sammour et al., 2020).

El amaranto también muestra alta tolerancia edáfica, al prosperar en suelos con pH alcalinos y soportar condiciones salinas o con presencia de aluminio. Es particularmente eficiente en la absorción de micronutrientes como fósforo, calcio y magnesio, lo cual lo convierte en una especie viable para cultivos en suelos marginales (Barca, 2018; Camino Gavilanes, 2021).

Respecto al agua, otro recurso crítico en el contexto climático, el amaranto puede crecer con precipitaciones anuales inferiores a 400 mm, extrayendo agua a profundidades de hasta 1.5 m. Su bajo requerimiento hídrico (2,673 m³/ha) y su capacidad de recuperación fisiológica tras el estrés en menos de cinco horas, lo posicionan como un cultivo resistente y de bajo consumo (Aguilar-Hernández et al., 2012; Dmitrieva y Ivanov, 2020).

El uso de especies silvestres como *A. hybridus* y *A. powellii* ha despertado interés por su alta capacidad adaptativa y su aporte potencial en el mejoramiento genético. Se ha documentado que ciertas proteínas acumuladas durante la embriogénesis tardía, particularmente las globulinas 11S, podrían estar implicadas en la protección de semillas ante condiciones adversas, abriendo nuevas rutas para investigaciones proteómicas y de biotecnología vegetal (Bojórquez-Velázquez et al., 2019).

Resiliencia y eficiencia agroecológica del amaranto

En el contexto agroecológico, los conceptos de resiliencia y eficiencia son fundamentales para el diseño de sistemas agrícolas sostenibles. La resiliencia se refiere a la capacidad de los agroecosistemas para absorber perturbaciones y recuperarse de eventos adversos como sequías, plagas, enfermedades o varia-

bilidad climática, mientras que la eficiencia implica el aprovechamiento óptimo de los recursos disponibles para maximizar la producción con mínimos insumos externos, promoviendo procesos biológicos autosustentables (Gliessman, 2018; Holling, 2001).

El *Amaranthus* spp. representa ambos atributos de manera destacada, se manifiesta en su capacidad de adaptación a una amplia gama de condiciones agroclimáticas, mencionadas anteriormente. El amaranto puede establecerse en suelos empobrecidos y en altitudes variables, por lo que lo convierte en una especie ideal para sistemas agrícolas de bajo insumo en zonas marginadas. Esta adaptabilidad permite mantener rendimientos estables incluso en contextos de alta vulnerabilidad agroclimática (De la Cruz-Guzmán et al., 2010).

La eficiencia del amaranto, por otro lado, se refleja en su capacidad de generar altos rendimientos, por ejemplo el foliar / biomasa verde (uso forrajero / biomasa total): la biomasa en verde puede ser muy alta; informes recientes dan 85-103 t/ha (biomasa fresca) y \approx 15-17 t/ha de materia seca, dependiendo del uso y la especie con un empleo reducido de agroquímicos, los cuales no son específicos para el amaranto, sino para el manejo agroquímico general de una zona específica (Sokolova et al., 2024). Diversos estudios han documentado que, bajo prácticas agroecológicas como el empleo de compostas, rotación de cultivos y control biológico, el amaranto puede alcanzar productividades competitivas sin comprometer la salud del suelo ni la biodiversidad del agroecosistema (Cabanillas et al., 2017; Al-Shammary et al., 2024). Esta eficiencia lo hace particularmente atractivo en escenarios de agricultura de transición o ecológica.

Además, el intervalo corto del ciclo de cultivo varía entre 90 y 120 días, dependiendo de la variedad y las condiciones desde la siembra hasta la cosecha del grano, lo convierte en una excelente opción para doble cosecha o para sistemas de agricultura urbana y periurbana, donde el espacio, el tiempo y el agua son limitados. Su densidad de siembra puede ajustarse según el sistema productivo, mientras que su rusticidad facilita el manejo técnico por parte de pequeños productores.

A nivel ecológico, incorporar el amaranto en sistemas agrícolas diversificados favorece el incremento de la biodiversidad funcional (organismos que influyen en el funcionamiento, la estabilidad y la productividad

de un ecosistema). Un ejemplo de ello se observa en el estado de Puebla, donde se cultiva en conjunto con maíz. Además, en diversas regiones de México, el amaranto forma parte del sistema tradicional de milpa, asociado con cultivos como frijol, tomate, haba y chile (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

Su morfología y fenología favorecen el establecimiento de interacciones tri-tróficas, tanto con insectos polinizadores como con enemigos naturales de plagas, promoviendo el equilibrio ecológico del sistema. De este modo, el amaranto no solo es eficiente desde el punto de vista productivo, sino que también actúa como facilitador ecológico en cultivos asociados (Fichetti et al., 2022; Pérez Torres et al., 2011).

El conjunto de estos dos aspectos convierte al amaranto en un cultivo clave para la transición agroecológica, capaz de integrarse tanto en esquemas tradicionales como en innovaciones tecnológicas sustentables. Su uso estratégico puede fortalecer la soberanía alimentaria, regenerar suelos degradados y diversificar la base productiva de regiones en riesgo climático.

Entomofauna benéfica y control biológico asociado al cultivo de amaranto

La diversidad de insectos asociados al cultivo de *Amaranthus* spp. no solo incluye plagas que afectan su desarrollo, sino también una rica entomofauna benéfica (diversidad de insectos benéficos para los cultivos) que desempeña un papel clave en el control biológico natural que encuentran, en esta planta, un microhábitat propicio para alimentarse, reproducirse o establecer sus ciclos de vida. Esta cadena tri-trófica, que sucede cuando interactúan la planta, el insecto plaga y su enemigo natural, contribuye al interés agroecológico del amaranto no solo por su resiliencia morfológica, sino por su capacidad de generar hábitats que fomentan relaciones ecológicas funcionales.

Desde la década de 1980, el cultivo de amaranto ha ganado relevancia tanto por su valor nutricional como por su adaptabilidad ecológica (Liu y Stützel, 2002; Omami y Hammes, 2006).

Los estudios entomológicos sobre *Amaranthus* spp. han estado mayoritariamente enfocados en el daño provocado por plagas. Sin embargo, cada vez hay mayor interés en identificar y valorar a los enemigos naturales presentes en estos agroecosistemas,

como depredadores, parasitoides y polinizadores, que podrían ser aprovechados en estrategias de manejo agroecológico.

Diversos estudios en México, Argentina y África han documentado la presencia de parasitoides de las familias Braconidae, Ichneumonidae, Tachinidae, Aphelinidae y Trichogrammatidae que atacan larvas de lepidópteros y áfidos presentes en el amaranto. En paralelo, se han reportado depredadores generalistas como *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville, *Coleomegilla maculata* De Geer, *Orius insidiosus* (Say), *Oplomus pulcher* Dallas y *Perillus bioculatus* Fabricius, todos con potencial para reducir poblaciones de plagas (Fichetti et al., 2022; Pérez Torres et al., 2011; Salas-Araiza y Boradonenko, 2006). Las diversas variedades de plantas de amaranto pueden fungir como reservorio natural de enemigos de insectos plaga, tanto en especies cultivadas como en silvestres (*A. cruentus*, *A. hypochondriacus*, *A. hybridus*), incluyendo incluso aquellas consideradas malezas (*A. palmeri* S. Watson, *A. retroflexus* L.), que podrían actuar como refugios ecológicos en los márgenes de los cultivos.

Los servicios ecosistémicos, es decir, cualquier beneficio que los seres humanos obtenemos de la naturaleza y de los procesos ecológicos, proporcionados por estos insectos benefician al amaranto directamente a través del control natural de plagas, reduciendo la necesidad de insecticidas y promoviendo sistemas más sostenibles. A diferencia de los depredadores, los parasitoides ofrecen una ventaja adicional: alta especificidad y escaso daño a las plantas hospedantes, lo cual los convierte en candidatos ideales para programas de control biológico (Istas y Szücs 2023; Wang et al., 2023). A pesar de esta riqueza entomológica, actualmente no se han establecido programas formales de control biológico específicamente diseñados para el cultivo de amaranto. Sin embargo, el potencial está claramente identificado en la literatura. La implementación de prácticas agroecológicas como el manejo de bordes, la diversificación de cultivos y la reducción del uso de plaguicidas sintéticos puede potenciar aún más la presencia y eficacia de estos organismos benéficos.

El conocimiento de la entomofauna asociada al amaranto aún es limitado, pero constituye una línea de investigación clave para mejorar su manejo integrado. Ampliar los estudios regionales sobre estos insectos, particularmente en condiciones de campo, contribuiría

significativamente al desarrollo de estrategias agroecológicas adaptadas, reduciendo la dependencia de insumos externos y fortaleciendo la sostenibilidad del cultivo.

Mecanismos defensivos del amaranto frente a la herbivoría: una perspectiva integradora

El cambio climático, además de afectar las condiciones edafoclimáticas, altera la dinámica ecológica entre plantas y herbívoros, generando desequilibrios que pueden incrementar la incidencia de plagas y reducir la productividad agrícola. En este contexto, comprender los mecanismos de defensa de las plantas resulta clave para diseñar estrategias de manejo sostenible. El amaranto, por su amplia historia de domesticación y coexistencia con insectos fitófagos, ha desarrollado diversas estrategias defensivas, tanto estructurales como bioquímicas (Yadav y Yadav, 2024).

En general, las plantas pueden defenderse mediante mecanismos constitutivos presentes permanentemente como parte de su estructura o mecanismos inducibles, que se activan tras el daño o la presencia de un atacante (Balaji y Jambagi, 2024). En *Amaranthus* spp. ambos tipos están presentes y se manifiestan de forma diversa a lo largo de sus fases fenológicas.

Entre los mecanismos estructurales, destacan los tricomas foliares (vellosidades), el grosor y dureza de hojas y tallos, así como la presencia de espinas o pigmentación intensa, los cuales dificultan el acceso y alimentación de insectos herbívoros. Se ha observado, por ejemplo, que las hojas rojizas de *A. cruentus*, ricas en betalainas (pigmentos rojos, altos en nitrógeno), presentan mayor resistencia a la herbivoría que las hojas verdes, efecto atribuido tanto a la coloración como a la actividad antioxidante y tóxica de estos compuestos (Portillo-Nava et al., 2021; Vorsah et al., 2020).

Desde el punto de vista genético, se han identificado genes relacionados con la defensa en amaranto. El gen Ah24, por ejemplo, mostró una fuerte expresión en *A. hypochondriacus* tras daño mecánico, sugiriendo una doble función en el desarrollo y la respuesta defensiva (Massange-Sánchez et al., 2015).

Los mecanismos químicos del amaranto también son notables. Esta planta produce una variedad de metabolitos secundarios como flavonoides, terpenos, saponinas, taninos y alcaloides, con efectos repelentes, tóxicos o antinutricionales para los insectos (Simmonds,

2003). Además, contiene inhibidores de proteasas y amilasas que interfieren con la digestión de herbívoros, afectando su desarrollo y supervivencia (Chagolla-Lopez et al., 1994; Nagamatsu López et al., 2004).

Las hormonas vegetales también desempeñan un papel esencial en las respuestas inducidas, el ácido jasmónico (JA) y el ácido salicílico (SA) son señalizadores clave en la defensa frente a insectos masticadores y succionadores, respectivamente. La aplicación exógena de JA en cultivos de amaranto ha demostrado eficacia como alternativa al uso de insecticidas (Howe, 2004; Walling, 2000). Otro mecanismo químico de defensa importante es la emisión de compuestos orgánicos volátiles tras el ataque, los cuales pueden atraer enemigos naturales de las plagas. Se ha reportado, por ejemplo, que el parasitoide *Microplitis mediator* Haliday es atraído por volátiles emitidos por *A. retroflexus* L., tras herbivoría por *Helicoverpa armigera* Hübner (Yu et al., 2018). Sin embargo, estas defensas tienen un costo fisiológico. La producción de metabolitos secundarios y proteínas defensivas compite por recursos con funciones vitales como el crecimiento y la reproducción, lo cual debe ser considerado en programas de manejo agrícola (Futuyma, 1998).

La herbivoría también induce cambios en el metabolismo primario de la planta, afectando procesos como la fotosíntesis y la asignación de nutrientes. La interacción entre defensa y rendimiento es, por tanto, un equilibrio dinámico que debe evaluarse según el contexto ecológico y productivo. En resumen, *Amaranthus* spp. cuenta con una diversidad de mecanismos de defensa que le permiten responder eficazmente al ataque de insectos herbívoros. La integración de este conocimiento con enfoques de manejo agroecológico y control biológico puede mejorar la sostenibilidad del cultivo, reducir el uso de agroquímicos y fortalecer su resiliencia a largo plazo.

Subproductos del amaranto y su potencial agroindustrial y biotecnológico

Además de su valor como grano alimenticio, el *Amaranthus* spp. genera diversos subproductos que poseen aplicaciones agroindustriales y biotecnológicas de alto valor agregado. Su biomasa total incluyendo hojas, tallos, semillas, almidón, aceites y pigmentos ofrece oportunidades para sectores como la alimen-

tación humana y animal, la industria cosmética, farmacéutica, nutracéutica y la producción de biocombustibles (Oteri et al., 2021; Vidal Torres et al., 2024).

Las hojas de amaranto ricas en proteínas, vitaminas y minerales son comestibles y se consumen ampliamente en diversas culturas. En México, se les conoce como "quelites" y se utilizan en sopas, guisos y ensaladas. En India, se preparan como "saag" y se incorporan en platos como el "saag paneer". En África, se utilizan en sopas y guisos, y en el Caribe, se conocen como "callaloo" y se emplean en sopas (Shaw, 2025). Su valor nutricional ha impulsado su inclusión como hortaliza funcional en dietas saludables y programas de seguridad alimentaria. Los tallos, por su alto contenido de fibra, representan una alternativa para forraje en alimentación animal, mientras que las semillas contienen proteínas de alto valor biológico, lípidos saludables, fibra y compuestos bioactivos, lo que permite su aprovechamiento tanto en alimentos funcionales como en ingredientes industriales (Pérez-Ramírez et al., 2022).

Uno de los compuestos más valiosos extraídos de las semillas es el escualeno, un triterpenoide (molécula orgánica de 30 carbonos) con propiedades antioxidantes, inmunoestimulantes y fotoprotectoras. Este compuesto tiene aplicaciones confirmadas en las industrias farmacéutica, cosmética y nutracéutica, así como en la formulación de vacunas como adyuvante inmunológico (Matías Luis et al., 2018; Lozano-Grande et al., 2018). En el amaranto, el contenido de escualeno puede representar del 5 % al 8 % del total del aceite, superando a fuentes vegetales como el girasol o el arroz (Becker, 1989; Sayed Ahmad et al., 2022).

Estudios han demostrado que el proceso de refinación del aceite de *A. hypochondriacus* mantiene niveles estables de escualeno, comparables con los del aceite de hígado de bacalao u oliva, pero sin los desafíos ecológicos asociados a estos (Cano-Hernández et al., 2016). Además, se ha identificado un bajo polimorfismo genético en el gen del escualeno sintasa (SQS), con variabilidad estructural en su región promotora, lo que abre la posibilidad de mejoramiento molecular dirigido para incrementar su concentración (Shcherban y Stasyuk, 2020).

Otro subproducto relevante es el pigmento amarantina, una betacianina extraída de las inflorescencias, usada como colorante natural en alimentos.

Su intensidad cromática y perfil no tóxico la hacen útil en productos funcionales y en formulaciones infantiles, además de cumplir con normativas de seguridad alimentaria (Borja Mayorga et al., 2019; Galarza Medina, 2013).

Desde el punto de vista industrial —el almidón de amaranto constituye entre el 50 % y el 60 % del peso seco del grano—, ha sido empleado en el desarrollo de biopolímeros biodegradables. Estos materiales se obtienen mediante combinaciones de almidón, proteínas y lípidos del amaranto, además de haber sido reforzados con nanocristales o nanoarcillas para mejorar sus propiedades mecánicas y de barrera (Cano-Hernández et al., 2016; Condés et al., 2018; Tapia-Blácido et al., 2007). La biomasa del amaranto también tiene potencial energético. Estudios realizados en Eslovenia y la India han documentado rendimientos de materia seca superiores a 60 t/ha, con capacidad para producir biodiesel y bioetanol. En particular, *A. palmeri* ha demostrado ser una fuente viable para biocombustibles gracias a su alta acumulación de lípidos en semillas cuando se fermentan con levaduras oleaginosas como *Cryptococcus vishniacii* Vishniac (Deeba et al., 2018; Viglasky et al., 2009) (Cuadro 2). Estos hallazgos reflejan el amplio potencial del amaranto como planta multifuncional, cuya valorización integral puede contribuir a cadenas de producción sostenibles, con impacto positivo en áreas rurales, en la diversificación de ingresos y en la innovación tecnológica del sector agroindustrial.

Fortalecimiento de la cadena de valor del amaranto: un enfoque agrobiotecnológico

El amaranto (*Amaranthus spp.*) no solo describe a un cultivo resiliente de alto valor nutricional, sino también un componente estratégico para fortalecer cadenas agroalimentarias sostenibles. Su aprovechamiento integral, desde la semilla hasta sus subproductos industriales, lo posiciona como un recurso con alto potencial para dinamizar economías locales, diversificar ingresos rurales y promover el desarrollo territorial inclusivo.

Para ello, es necesario abordar el fortalecimiento de la cadena de valor del amaranto desde un enfoque agroecológico y biotecnológico integrado, que contemple intervenciones en los eslabones críticos de producción, transformación, distribución, comercialización y consumo.

Desde el componente productivo, se requiere promover prácticas agrícolas sostenibles que aumenten la eficiencia del cultivo, reduzcan la dependencia de insumos sintéticos y favorezcan la resiliencia ante el cambio climático. Esto incluye la capacitación técnica de productores, el manejo ecológico de suelos, el uso de variedades mejoradas y la integración de tecnologías de precisión adaptadas a pequeña escala.

En el ámbito tecnológico, la aplicación de herramientas biotecnológicas puede mejorar la calidad y rendimiento del amaranto. El análisis genómico de características como tolerancia a estrés, contenido de escualeno o producción de metabolitos secundarios

Cuadro 2. Principales usos industriales de las partes de la planta de amaranto.

Parte de la planta	Especie	Criterios de Exclusión	Uso	Referencia
Grano	<i>A. hypochondriacus</i>	Escualeno	Nutraceutico	Cano-Hernández et al. (2016)
Grano	<i>A. cruentus</i>	Escualeno refinado	Complemento alimenticio	Becker (1989)
Granos y semillas	<i>Amaranthus spp.</i>	Escualeno	Cosmético	Matías Luis et al. (2018)
Inflorescencia	<i>A. quitensis</i>	Betanina (amarantina)	Aditivo (colorante)	Borja Mayorga et al. (2019)
Grano	<i>A. caudatus</i>	Almidón	Biopolímero	Villamán Diéguez et al. (2015)
Grano	<i>A. hypochondriacus</i>	Proteínas y lípidos	Biopolímero, suplementos	Tapia-Blácido et al. (2007)
Biomasa	<i>A. cruentus</i>	Bioetanol	Energético	Xaba (2014)
Biomasa	<i>A. palmeri</i>	Biodiesel	Energético	Deeba et al. (2018)

puede orientar programas de mejoramiento genético participativo, además de optimizar rasgos agronómicos clave sin comprometer la diversidad genética local (Singh et al., 2025).

Asimismo, el desarrollo de procesos de transformación y agregación de valor es esencial para ampliar las oportunidades comerciales. La implementación de unidades de procesamiento local para obtención de harinas, aceites, pigmentos o biomateriales permite reducir la pérdida postcosecha y aumentar el valor económico del cultivo. Estas acciones deben ir acompañadas de estrategias de etiquetado, certificación de calidad y acceso a mercados diferenciados, incluyendo aquellos con orientación funcional o sustentable (Orona-Tamayo y Paredes-Lopez, 2024).

Un eslabón crítico para consolidar la cadena de valor del amaranto es la distribución y comercialización. Las barreras actuales incluyen baja estandarización del producto, escasa infraestructura de acopio y transformación, además de conocimiento limitado de consumidores sobre sus beneficios. Para resolverlo, se requiere vincular actores públicos, privados y sociales, además de fomentar redes cooperativas, canales cortos de comercialización, circuitos de comercio justo y plataformas digitales que conecten oferta y demanda.

Finalmente, el consumo consciente debe fomentarse mediante campañas de educación alimentaria, posicionamiento del amaranto como alimento funcional y estrategias de *marketing* basadas en sus atributos ecológicos, históricos y nutracéuticos. El enfoque de cadena debe contemplar también políticas públicas que reconozcan el valor estratégico del cultivo y faciliten su incorporación en programas de alimentación escolar, subsidios agrícolas o esquemas de incentivos por servicios ecosistémicos.

Experiencias en regiones de África y América Latina demuestran que un enfoque sistémico, con visión de largo plazo, puede convertir cultivos subutilizados como el amaranto en motores de transformación rural sostenible (Dizyee et al., 2020; Nzomo et al., 2015).

En resumen, el fortalecimiento de la cadena de valor del amaranto requiere un enfoque transversal que articule ciencia, tecnología, economía y cultura. Su desarrollo no solo tiene implicaciones en la soberanía alimentaria, sino también en la justicia social, la mitigación climática y la innovación productiva.

CONCLUSIONES

El amaranto simboliza un cultivo de alto valor estratégico en el contexto de la agricultura sostenible, gracias a sus atributos de resiliencia agroecológica, eficiencia productiva y versatilidad biotecnológica. Su capacidad para adaptarse a condiciones ambientales extremas, su bajo requerimiento de insumos y su habilidad para integrarse en sistemas agrícolas diversificados lo posicionan como una alternativa clave frente a los desafíos del cambio climático y la inseguridad alimentaria.

La evidencia científica revisada demuestra que el amaranto no solo tiene un papel destacado como fuente nutricional, sino también como facilitador ecológico, al interactuar con organismos benéficos en el control biológico de plagas, y como recurso industrial multifuncional, mediante el aprovechamiento de sus subproductos en sectores como la cosmética, la energía, la farmacéutica y la producción de biopolímeros.

Sin embargo, a pesar de estas cualidades, el cultivo sigue siendo marginal en muchas regiones de México y América Latina debido a limitaciones en su cadena de valor, baja tecnificación y percepción limitada por parte de consumidores y tomadores de decisiones. Esta revisión señala la necesidad de impulsar investigaciones de ciencias básicas y aplicadas, políticas públicas inclusivas, además de esquemas de comercialización innovadores que promuevan su cultivo, transformación y consumo.

En este sentido, el amaranto debe ser considerado no solo como un alimento ancestral, sino como un componente clave para la transición hacia sistemas agroalimentarios más resilientes, circulares e integradores. Revalorarlo desde una perspectiva interdisciplinaria permitirá avanzar hacia objetivos comunes de sostenibilidad, equidad y seguridad alimentaria.

AGRADECIMIENTOS

A José Antonio Cortes Álvarez y Arturo Sánchez Sainz, así como a la Universidad del Valle de Atemajac y al Departamento de Botánica y Zoología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara, por el apoyo y soporte institucional brindado para la elaboración de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Aguilar-Hernández, H. S., Barba de la Rosa, A. P., Espitia-Rangel, E., & Huerta-Ocampo, J. Á. (2012). Identificación de genes de respuesta a estrés por calcio y sequía en amaranto. En E. Espitia Rangel (Ed.), *Amaranto: ciencia y tecnología* (pp. 49-58). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura.
- Al-Shammary, A. A. G., Al-Shihmani, L. S. S., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364, 121487. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121487>
- Balaji, B. N., & Jambagi, S. R. (2024). Structural defenses in plants against herbivores: a review. *Indian Journal of Entomology*, 87(2), 488-496. <https://doi.org/10.55446/IJE.2024.2031>
- Barca, H. J. (2018). *Tolerancia a estrés salino con Amaranthus spp.* [Tesis de doctorado inédita]. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- Bari, M. N., & Alfaki, M. A. (2023). Antimicrobial activity of *Amaranthus caudatus* extract against multidrug resistant *Acinetobacter baumannii* and *Klebsiella pneumoniae*. *The New Armenian Medical Journal*, 17(2), 118-125. <https://doi.org/10.56936/18290825-2023.17.2-118>
- Becker, R. (1989). Preparation, composition and nutritional implications of amaranth seed oil. *Cereal Foods World*, 34(11), 950-953.
- Bojórquez-Velázquez, E., Barrera-Pacheco, A., Espitia-Rangel, E., Herrera-Estrella, A., & Barba de la Rosa, A. P. (2019). Protein analysis reveals differential accumulation of late embryogenesis abundant and storage proteins in seeds of wild and cultivated amaranth species. *BMC Plant Biology*, 19, 59. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1656-7>
- Borja Mayorga, D. F., Yungán Cazar, J. C., Villota García, V. P., Chuiza Rojas, M. R., & Brito Moina, H. L. (2019). Obtención y determinación de la calidad de colorante a partir de las flores de Sangorache. *Ciencia Digital*, 3(2.4), 27-35. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.4.504>
- Cabanillas, C., Tablada, M., Ferreyra, L., Pérez, A., & Sucani, G. (2017). Sustainable management strategies focused on native bio-inputs in *Amaranthus cruentus* L. in agro-ecological farms in transition. *Journal of Cleaner Production*, 142(Part 1), 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.065>
- Camino Gavilanes, J. F. (2021). *Evaluación de tres mejoradores de pH con tres dosis en el cultivo de Amaranto (Amaranthus cruentus L.) en el sector Salache, Cantón Latacunga, provincia Cotopaxi 2021* [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad técnica de Cotopaxi.
- Cano-Hernández, M., Resendiz-Otero, M. F., Ronces-Arrieta, R., Betanzos-Cabrera, G., Suárez-Dieguez, T., Hernández-León, J., & Ariza-Ortega, J. A. (2016). Cuantificación de escualeno en el aceite de amaranto crudo y refinado. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 4(8). <https://doi.org/10.29057/icsa.v4i8.282>
- Cechin, I., da Silva, L. P., Ferreira, E. T., Barrochelo, S. C., de Melo, F. P. de S. R., Dokkedal, A. L., & Saldanha, L. L. (2022) Physiological responses of *Amaranthus cruentus* L. to drought stress under sufficient- and deficient-nitrogen conditions. *PLoS ONE*, 17(7), e0270849. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270849>
- Chagolla-Lopez, A., Blanco-Labra, A., Patthy, A., Sánchez, R., & Pongor, S. (1994). A novel alpha-amylase inhibitor from amaranth (*Amaranthus hypocondriacus*) seeds. *Journal of Biological Chemistry*, 269(38), 23675-23680. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(17\)31568-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(17)31568-5)
- Clarivate. (2023). EndNote. [https://endnote.com/\(2021](https://endnote.com/(2021)
- Condés, M. C., Añón, M. C., Dufresne, A., & Mauri, A. N. (2018). Composite and nanocomposite films based on amaranth biopolymers. *Food Hydrocolloids*, 74, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.07.013>
- Deeba, F., Patel, A., Arora, N., Pruthi, V., Pruthi, P. A., & Negi, Y. S. (2018). Amaranth seeds (*Amaranthus palmeri* L.) as novel feedstock for biodiesel production by oleaginous yeast. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 353-362. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0444-x>
- De la Cruz-Guzmán, G. H., Arriaga-Frías, A., Mandujano-Piña, M., & González Moreno, S. (2010). Efecto de la sequía sobre algunas variables hídricas y morfométricas en cinco genotipos de *Amaranthus*. *Idesia*, 28(3), 87-95. <http://doi.org/10.4067/S0718-34292010000300011>
- Dizyee, K., Baker, D., Herrero, M., Burrow, H., McMillan, L., Sila, D. N., & Rich, K. M. (2020). The promotion of amaranth value chains for livelihood enhancement in East Africa: A systems modelling approach. *African Journal of Agricultural and Resource Economics*, 15(2), 81-94. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.307620>

- Dmitrieva, O., & Ivanov, S. (2020). Comparative study of amaranth species (*Amaranthus* spp.) in the temperate continental climate of Russian Federation. *Acta Agriculturae Slovenica*, 115(1), 15-24. <https://doi.org/10.14720/aas.2020.115.1.1281>
- Egea, I., Estrada, Y., Faura, C., Egea-Fernández, J. M., Bolarin, M. C., & Flores, F. B. (2023). Salt-tolerant alternative crops as sources of quality food to mitigate the negative impact of salinity on agricultural production. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1092885. [http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1092885](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1092885)
- Espitia-Rangel, E., Mapes-Sánchez, C., Escobedo-López, D., Rojas-Martínez, I., & De la O-Olán, M. (2020). *Amaranto: Un cultivo subutilizado con potencial para la seguridad alimentaria en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Los 10 elementos de la agroecología. Guía para la transición hacia sistemas alimentarios y agrícolas sostenibles*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The State of Food Security and Nutrition in the World Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All*. FAO.
- Fichetti, P. C., Grosso, G. M., Moscardó, M. L., Chalup, A., Galvan, G. H., & Avalos, D. S. (2022). Comunidad de insectos fitófagos y enemigos naturales asociados al cultivo de *Amaranthus hypochondriacus* L. en la región central de Córdoba (Argentina). *Agriscentia*, 39, 93-103. [http://doi.org/10.31047/1668.298x.v39.n1.34595](https://doi.org/10.31047/1668.298x.v39.n1.34595)
- Futuyma, D. J. (1998). Wherefore and whither the Naturalist? *American Naturalist*, 151(1), 1-6. <https://doi.org/10.1086/286097>
- Galarza Medina, C. H. (2013). *Obtención de un colorante a partir de las flores de ataco o sangorache (Amaranthus spp.)* [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad Técnica de Ambato.
- Glissman, S. (2018). Defining agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), 599-600.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4(5), 390-405. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5>
- Howe, G. (2004). The role of hormones in defense against insects and disease. En P. J. Davies (Ed.), *Plant Hormones Biosynthesis, Signal Transduction, Action* (pp. 610-634). Kluwer Academic Publishers.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022-Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Istas, O., & Szücs, M. (2023). Biological control potential of a laboratory selected generalist parasitoid versus a co evolved specialist parasitoid against the invasive *Drosophila suzukii*. *Evolutionary Applications*, 16(11), 1819-1829. <https://doi.org/10.1111/eva.13605>
- Jacobsen, S.-E., & Sherwood, S. (2002). *Cultivo de granos andinos en Ecuador. Informe sobre los rubros quinua, chocho y amaranto*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Centro Internacional de la Papa, Catholic Relief Services.
- Kuluev, B. R., Mikhaylova, E. V., Taipova, R. M., & Chemeris, A. V. (2017). Changes in phenotype of transgenic amaranth *Amaranthus retroflexus* L., overexpressing ARGOS-LIKE gene. *Plant Genetics*, 53(1), 67-75. <https://doi.org/10.1134/S1022795416120061>
- Liu, F., & Stützel, H. (2002). Leaf water relations of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to soil drying. *European Journal of Agronomy*, 16(2), 137-150. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00122-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00122-8)
- Lozano-Grande, M. A., Gorinstein, S., Espitia-Rangel, E., Dávila-Ortiz, G., & Martínez-Ayala, A. L. (2018). Plant sources, extraction methods, and uses of squalene. *International Journal of Agronomy*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/1829160>
- MacNeish, R. S. (1964). Ancient Mesoamerican civilization. *Science*, 143(3606), 531-537. <https://doi.org/10.1126/science.143.3606.531>
- Mapes-Sánchez, E. C., & Espitia-Rangel, E. (2009). *Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género Amaranthus cultivadas y de sus posibles parentes silvestres en México*. Universidad Nacional Autónoma de México; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Massange-Sánchez, J. A., Palmeros-Suarez, P. A., Martínez-Gallardo, N. A., Castrillon-Arbelaez, P. A., Avilés-Arnaut, H., Alatorre-Cobos, F., Tiessen, A., & Délano-Frier, J. P. (2015). The novel and taxonomically restricted Ah24 gene from grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) has a dual role in development and defense. *Frontiers in Plant Science*, 6, 602. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00602>

- Matías Luis, G., Hernández Hernández, B. R., Peña Caballero, V., Torres López, N. G., Espinoza Martínez, V. A., & Ramírez Pacheco, L. (2018). Usos actuales y potenciales del amaranto (*Amaranthus spp.*). *Journal of Negative and No Positive Results*, 3(6), 423-436. <http://doi.org/10.19230/jonnpr.2410>
- Mejía-Valvas, R. L., Gómez-Pando, L., & Pineda-Taco, R. (2021). Caracterización de las unidades productivas del cultivo de kiwicha (*Amaranthus caudatus*) en las provincias de Yungay, Huaylas y Carhuaz, en el departamento de Áncash, Perú. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), 1-20. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1440
- Mendoza Hernández, C. S. (2011). *Análisis proteómico de la hoja de amaranto bajo condiciones de estrés salino* [Tesis de maestría inédita]. Instituto Potosino de Investigación Científica y tecnológica.
- Modi, A. T. (2007). Growth temperature and plant age influence on nutritional quality of *Amaranthus* leaves and seed germination capacity. *Water SA*, 33(3), 369-376. <http://doi.org/10.4314/wsa.v33i3.180598>
- Nagamatsu López, Y., Blanco Labra, A., Délano-Frier, J., & Pimienta Barrios, E. (2004). Intensidad luminosa y actividad de inhibidores de tripsina en hojas y semillas de amaranto. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(2), 127-132. <https://doi.org/10.35196/rfm.2004.2.127>
- Nzomo, E. M., Ariyawardana, A., Sila, D. N., & Sellahewa, J. N. (2015, 1 de octubre). Reaping the potential benefits of amaranth: Value chain challenges ahead for Kenya. En *xxix International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes*. Brisbane, Australia.
- Omami, E. N., & Hammes, P. S. (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. <https://doi.org/10.1080/01140671.2006.9514385>
- Orona-Tamayo, D., & Paredes-Lopez, O. (2024). Amaranth Part 2-Sustainable crop for the 21st century: food properties and nutraceuticals for improving human health. En S. Nadathur, J. P.d. Wanasinghe, L. Scanlin (Eds.), *Sustainable Protein Sources. Advances for a Healthier Tomorrow* (pp. 413-441). Academic Press. <http://doi.org/10.1016/b978-0-323-91652-3.00017-4>
- Oteri, M., Gresta, F., Costale, A., Lo Presti, V., Meineri, G., & Chiofalo, B. (2021) *Amaranthus hypochondriacus* L. as a sustainable source of nutrients and bioactive compounds for animal feeding. *Antioxidants*, 10(6), 876. <http://doi.org/10.3390/antiox10060876>
- Pérez-Ramírez, I. F., Sotelo-González, A. M., López-Echevarría, G., & Martínez-Maldonado, M. A. (2022). Amaranth seeds and sprouts as functional ingredients for the development of dietary fiber, betalains, and polyphenol-enriched minced tilapia meat gels. *Molecules*, 28(1), 117. <https://doi.org/10.3390/molecules28010117>
- Pérez Torres, B. C., Aragón García, A., Pérez Avilés, R., Hernández, L. R., & López Olguín, J. F. (2011). Estudio entomofaunístico del cultivo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) en Puebla México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 359-371.
- Portillo-Nava, C., Guerrero-Esperanza, M., Guerrero-Rangel, A., Guevara-Domínguez, P., Martínez-Gallardo, N., Nava-Sandoval, C., Ordaz-Ortiz, J., Sánchez-Segura, L., & Délano-Frier, J. (2021). Natural or light-induced pigment accumulation in grain amaranths coincides with enhanced resistance against insect herbivory. *Planta*, 254(5), 101. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03757-3>
- Rockström, J., Beringer, T., Hole, D., Griscom, B., Mascia, M. B., Folke, C., & Creutzig, F. (2021). Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(38), e2115218118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115218118>
- Salas-Araiza, M. D., & Boradonenko, A. (2006). Insectos asociados al amaranto *Amaranthus hypochondriacus* L. (Amaranthaceae) en Irapuato, Guanajuato, México. *Acta Universitaria*, 16(1), 50-55. <https://doi.org/10.15174/au.2006.203>
- Sammour, R. H., Mira, M., Radwan, S., & Fahmey, S. (2020). Genetic diversity and phylogenetic relationships among and within *Amaranthus* spp. using RAPD markers. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913254. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3254>
- Sánchez-Olarte, J., Argumedo-Macías, A., Álvarez-Gaxiola, J. F., Méndez-Espinoza, J. A., & Ortiz-Espejel, B. (2015). Conocimiento tradicional en prácticas agrícolas en el sistema del cultivo de amaranto en Tochimilco, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(2), 237-254.
- Sayed Ahmad, B., Urrutigoity, M., Hijazi, A., Saad, Z., Cerny, M., Evon, P., Taliu, T., & Merah, O. (2022). Amaranth oilseed composition and cosmetic applications. *Separations*, 9(7), 181. <https://doi.org/10.3390/separations9070181>

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020, 13 de marzo). *Aporta México 14 variedades de amaranto como parte del fomento a la producción y consumo de alimentos de alto valor nutritivo*. <https://www.gob.mx/agricultura/galerias/aporta-mexico-14-variedades-de-amaranto-como-parte-del-fomento-a-la-produccion-y-consumo-de-alimentos-de-alto-valor-nutritivo-agricultura-254673>
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H. H., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/plants10020259>
- Shaw, H. (2025, 24 de mayo). *Growing and Cooking Amaranth Greens. Hunter Angler Gardener Cook*. <https://honest-food.net/amaranth-greens/>
- Shcherban, A. B., & Stasyuk, A. I. (2020). Polymorphism of the squalene synthase gene (*sqS*) in different species of amaranth (*Amaranthus* L.). *Russian Journal of Genetics*, 56(3), 298-306. <https://doi.org/10.1134/S102279542003014X>
- Shukla, S., Bhargava, A., Chatterjee, A., Pandey, A. C., & Mishra, B. K. (2010). Diversity in phenotypic and nutritional traits in vegetable amaranth (*Amaranthus tricolor*), a nutritionally underutilised crop. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(1), 139-144. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3797>
- Siadjeu, C., Lauterbach, M., & Kadereit, G. (2021). Insights into regulation of C₂ and C₄ photosynthesis in Amaranthaceae/Chenopodiaceae using RNA-Seq. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22), 12120. <https://doi.org/10.3390/ijms222212120>
- Singh, A., Maurya, A., Gupta, R., Joshi, P., Rajkumar, S., Singh, A. K., Bhardwaj, R., Singh, G. P., & Singh, R. (2025). Genome-wide identification and expression profiling of WRKY gene family in grain amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.) under salinity and drought stresses. *BMC Plant Biology*, 25, 265. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06270-x>
- Simmonds, M. S. J. (2003). Flavonoid-insect interactions: recent advances in our knowledge. *Phytochemistry*, 64(1), 21-30. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(03\)00293-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(03)00293-0)
- Sokolova, D. V., Solovieva, A. E., Zaretsky, A. M., & Shelenga, T. V. (2024). The potential of the amaranth collection maintained at VIR in the context of global plant breeding and utilization trends. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii*, 28(7), 731-743. <https://doi.org/10.18699/vjgb-24-81>
- Stallknecht, G. F., & Schulz-Schaeffer, J. R. (1993). Amaranth rediscovered. En J. Janick & J. E. Simon (Eds.), *New Crops* (pp. 211-218). Wiley.
- Tapia-Blácido, D., Mauri, A. N., Menegalli, F. C., Sobral, P. J. A., & Añón, M. C. (2007). Contribution of the starch, protein, and lipid fractions to the physical, thermal, and structural properties of amaranth (*Amaranthus caudatus*). *Journal of Food Science*, 72(5), E293-E300. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00359>
- Vargas-Ortiz, E., Ramírez-Tobias, H. M., González-Escobar, J. L., Gutiérrez-García, A. K., Bojórquez-Velázquez, E., Espitia-Rangel, E., & Barba de la Rosa, A. P. (2021). Biomass, chlorophyll fluorescence, and osmoregulation traits let differentiation of wild and cultivated *Amaranthus* under water stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 220, 112210. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112210>
- Vidal Torres, E., Valencia, E., Simsek, S., & Linares Ramírez, A. M. (2024). Amaranth: multipurpose agroindustrial crop. *Agronomy*, 14(10), 2323. <https://doi.org/10.3390/agronomy14102323>
- Viglasky, J., Andrejčák, I., Huska, J., & Suchomel, J. (2009). Amaranth (*Amaranthus* L.) is a potential source of raw material for biofuels production. *Agronomy Research*, 7(2), 865-873.
- Villamán Diéguez, M. C., Pelissari, F. M., Sobral, P. J. A., & Menegalli, F. C. (2015). Effect of process conditions on the production of nanocomposite films based on amaranth flour and montmorillonite. *LWT - Food Science and Technology*, 61(1), 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.017>
- Vorsah, R. V., Dingha, B. N., Gyawaly, S., Fremah, S. A., Sharma, H., Bhowmik, A., Worku, M., & Jackai, L. E. (2020). Organic mulch increases insect herbivory by the flea beetle species, *Disonycha glabrata*, on *Amaranthus* spp. *Insects*, 11(3), 162. <https://doi.org/10.3390/insects11030162>
- Walling, L. L. (2000). The myriad plant responses to herbivores. *Journal of Plant Growth Regulation*, 19(2), 195-216. <https://doi.org/10.1007/s003440000026>
- Wang, S. T., & Ebert, A. W. (2012). Breeding of leafy amaranth for adaptation to climate change. En *Regional Symposium on High Value Vegetables in Southeast Asia: Production, Supply and Demand* (SEAVEG), 24-26 de ene-

- ro de 2012, The World Vegetable Center. Chiang Mai, Thailand.
- Wang, A.-Y., Peng, Y.-Q., Cook, J. M., Yang, D.-R., Zhang, D.-Y., & Liao, W.-J. (2023). Host insect specificity and interspecific competition drive parasitoid diversification in a plant-insect community. *Ecology*, 104(7), e4062. <https://doi.org/10.1002/ecy.4062>
- Xaba, N. (2014). *Use of Amaranth as Feedstock for Bio-ethanol Production* [Tesis de maestría inédita]. North-West University.
- Yadav, A., & Yadav, K. (2024). From humble beginnings to nutritional powerhouse: the rise of amaranth as a climate resilient superfood. *Tropical Plants*, 3, e037. <https://doi.org/10.48130/tp-0024-0037>
- Yu, H., Zhang, Y., Li, Y., Lu, Z., & Li, X. (2018). Herbivore- and MeJA-induced volatile emissions from the redroot pigweed *Amaranthus retroflexus* Linnaeus: their roles in attracting *Microplitis mediator* (Haliday) parasitoids. *Arthropod-Plant Interactions*, 12(4), 575-589.