



LOCALIZACIÓN DE CONDICIONES AGROCLIMÁTICAS BAJO TEMPORAL ADECUADAS PARA *Amaranthus* spp. EN MÉXICO

LOCALIZATION OF RAINFED AGROCLIMATIC CONDITIONS SUITABLE FOR *Amaranthus* spp. IN MEXICO

Genovevo Ramírez-Jaramillo¹, Jorge Humberto Ramírez-Silva¹,
Mónica Guadalupe Lozano-Contreras^{2*} y Micaela de la O-Olán³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional Sureste, Mérida, Yucatán, México. ²INIFAP, Campo Experimental Mocochá, Mocochá, Yucatán, México. ³INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (lozano.monica@inifap.gob.mx)

RESUMEN

El amaranto (*Amaranthus* spp.) es una planta que ha desempeñado un papel fundamental en la cultura y la agricultura de México desde tiempos precolombinos. En México se han generado iniciativas para el fomento de este cultivo, como el decreto de ley de fomento al cultivo del amaranto y la declaración del 15 de octubre como el Día Nacional del Amaranto, que pretende reconocer el aporte cultural, ecológico, social y agrícola de este alimento. Ante la perspectiva de que se incremente la superficie de cultivo en el país, es importante identificar condiciones adecuadas para su desarrollo y definir los sitios donde éste se puede promover en México. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue definir las áreas de México con potencial productivo en condiciones de temporal para la producción de amaranto. Se consideraron los requerimientos de altitud, temperatura, precipitación, intensidad lumínica y suelo requerido por el amaranto, mediante la consulta de bases de datos, bibliografía y expertos en el cultivo. Para la determinación de las zonas potenciales se empleó el software QGIS 3.22.14 Batioweiza. Las bases de dato usadas fueron los modelos de elevación digital del INEGI, de temperatura media y precipitación de WorldClim versión 2.0, y de suelos. La escala empleada fue de 1:250,000. Se encontró que las zonas de alto potencial se localizan en 26 de los 32 estados de la República Mexicana. Las mayores superficies bajo condiciones de temporal para producir amaranto se ubicaron en Jalisco, Michoacán, Estado de México, Oaxaca, Puebla y Guanajuato. Se determinó que existen 7,621,722 ha de alto potencial y 1,054,665 ha, de mediano potencial para la producción de amaranto en México bajo condiciones de temporal.

Palabras clave: Huauhtli, potencial productivo, regionalización, SIG.

SUMMARY

Amaranth (*Amaranthus* spp.) is a plant that has played a fundamental role in Mexican culture and agriculture since pre-Columbian times. In Mexico, initiatives have been taken to promote this crop, such as the decree of law promoting amaranth cultivation, and the declaration of October 15th as the National Day of Amaranth, which aims to recognize the cultural, ecological, social and agricultural contribution of this food. In view of the prospect of an increase in the area under cultivation of amaranth in the country, it is important to identify appropriate conditions for its development and define the sites where its cultivation should be promoted in Mexico. Therefore, the objective of this research was to define the areas in Mexico with productive potential for amaranth production under rainfed conditions. The altitude, temperature, precipitation, light intensity and soil requirements for amaranth were

considered by consulting databases, bibliography and experts in the crop. The QGIS 3.22.14 Batioweiza software was used. The databases consulted were the INEGI digital elevation model, the average temperature and precipitation of WorldClim version 2.0, and soils. The scale used was 1:250,000. It was found that high potential zones are located in 26 of the 32 states of the Mexican republic. The largest areas under rainfed conditions to produce amaranth were located in Jalisco, Michoacan, State of Mexico, Oaxaca, Puebla and Guanajuato. It was determined that there are 7,621,722 ha of high potential and 1,054,665 ha of medium potential for amaranth production in Mexico under rainfed conditions.

Index words: GIS, huauhtli, productive potential, regionalization.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cultivo del amaranto ha ganado relevancia como alternativa importante para la salud, se le ha considerado un superalimento con múltiples beneficios (Caselato-Sousa y Amaya-Farfán, 2012; Venskutonis y Kraujalis, 2013). Tiene un alto valor nutricional, esencial para el crecimiento en humanos (Manassero *et al.*, 2020); su contenido de proteína oscila entre 12 y 19 %, destacando la presencia de aminoácidos como lisina, valina, metionina, fenilalanina y treonina (Espitia-Rangel *et al.*, 2022). A nivel agronómico, el amaranto es un cultivo redituable, de ciclo corto, resistente a sequía y altas temperaturas, y lo más importante, que se adapta bien a diversas condiciones ambientales, a diferencia de algunos cereales (Alemayehu *et al.*, 2015; Dabija *et al.*, 2022; García-Pereyra *et al.*, 2009).

Este cultivo tuvo importancia dentro de las culturas precolombinas de América como alimento, tributo, y en rituales relacionados con sus deidades (Flores y Ríos, 2021).

México alberga el centro de diversidad y domesticación más relevante de esta planta (Mapes, 2010). Las especies de amaranto domesticadas para grano descienden presumiblemente de la especie silvestre *A. hybridus*,

aunque su origen y relaciones taxonómicas siguen siendo inciertos (Stetter *et al.*, 2016; Wu y Blair, 2017). Mapes (2015) señaló que *Amaranthus hypochondriacus* se domesticó en el centro de México y se distribuyó ampliamente en todo el país, del que se formaron centros secundarios de diversificación, ya que se cultiva en los Himalaya, Nepal y sur de la India, mientras que se propone que la domesticación de *A. cruentus* se produjo en América Central. Por otro lado, *A. caudatus* es originaria de los Andes, el cual se difundió a zonas templadas y subtropicales (Espitia *et al.*, 2010; Stetter *et al.*, 2016).

En la familia Amarantácea se estiman que existen aproximadamente 70 especies, de las cuales 40 son nativas de América, las otras 30 pertenecen a Australia, Asia, África y Europa; sin embargo, solamente 17 son comestibles (López-López y Alonso-Arenas, 2019). En la actualidad, el amaranto se cultiva en todo el mundo, principalmente en América, el Sudeste Asiático, Europa y África (Srivastava *et al.*, 2021). El mayor productor mundial es China (Aderibigbe *et al.*, 2022).

En amaranto, tres especies son importantes para producción de grano blanco, *Amaranthus hypochondriacus*, *A. cruentus* y *A. caudatus*. Estas especies poseen diferentes potenciales de adaptación a condiciones ambientales; por ejemplo, la especie *A. hypochondriacus* L. se puede adaptar en clima templado y altitudes de 1500 a 2200 msnm, mientras que *A. cruentus* y *A. caudatus* se adaptan a climas cálidos y altitudes de 400 a 1500 msnm y de 2800 y 3000 msnm, respectivamente (Espitia-Rangel *et al.*, 2010; García-Pereyra *et al.*, 2011). Según estudios de Espitia *et al.* (2010), las especies cultivadas *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* se encuentran en la región centro-sur de México, mientras que la especie silvestre *A. hybridus* está distribuida prácticamente en todo el país.

El incremento a nivel internacional y nacional de la demanda del cultivo de amaranto ha generado gran interés en rescatarlo para la alimentación de la población, lo que se refleja en el incremento en las superficies de producción (Espitia *et al.*, 2018; Sánchez y Navarrete, 2017).

La utilización de mapas facilita el manejo adecuado de los recursos y es un apoyo en la elaboración de políticas públicas, en la gestión agropecuaria y el ordenamiento territorial. Para identificar áreas óptimas para la producción agrícola de los cultivos se emplean diversas metodologías, en los años 1990 se utilizaron métodos estadísticos que clasificaban las tierras de labor en cinco categorías, desde muy productivas hasta marginales. Los criterios incluyeron la relación precipitación/evaporación, la profundidad del suelo y la altitud, con escalas de

1:250,000 y 1:50,000, en áreas con datos específicos sobre sus suelos (García *et al.*, 1999). Por otro lado, Medina *et al.* (1997) propusieron una metodología innovadora para evaluar el potencial productivo de especies vegetales en México. Esta metodología integra el modelado de datos climáticos, edáficos y fisiográficos mediante sistemas de información geográfica (SIG), considerando los requerimientos específicos de los cultivos. El enfoque se centra en el manejo de información en formato matricial (ráster), utilizando herramientas como fotografías aéreas digitales, imágenes satelitales, mapas escaneados y otras representaciones digitales (Vázquez, 2017). Actualmente, el empleo de sistemas de información geográfica (SIG) es una técnica exitosa para delimitar áreas de alto potencial productivo de los cultivos (Kahsay *et al.*, 2018), y existen varios proyectos de software libre que representan una alternativa viable para su implementación. A través de los SIG se pueden utilizar variables agroecológicas que representan el medio físico como clima, suelo y recursos hídricos, y su distribución espacial para detectar áreas óptimas y subóptimas.

Por lo anterior, es posible conocer las regiones con aptitud para el cultivo de amaranto donde se puede promover su cultivo. Frente a este panorama, el objetivo del presente estudio fue identificar zonas de México que presentan condiciones óptimas y subóptimas de clima, suelo y altitud para el desarrollo ideal del cultivo de amaranto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Herramientas empleadas

Se empleó un sistemas de información geográfica y álgebra de mapas. El álgebra de mapas se utilizó para combinar diferentes capas o variables territoriales a fin de obtener mapas alternativos de información vinculada con una aptitud o aspecto concreto del territorio (Arias y González, 2016). En este caso, el álgebra de mapas se aplicó para la localización de las zonas más aptas para producir amaranto en condiciones de temporal bajo un criterio ecológico, donde se combinó cartografía climática, de suelos, pendientes y altitudes. Con ayuda de la simbología se discriminaron las zonas más aptas a las cuales se les denominó como zonas de alto potencial y las menos adecuadas como zonas no aptas.

En este estudio se consideraron tres etapas fundamentales para definir las áreas con potencial: 1) identificar necesidades de altitud, temperatura, precipitación y suelo del cultivo del amaranto, 2) localizar bases de datos de condiciones agroclimáticas de México, y 3) procesamiento de los datos (Figura 1).

Determinación de las necesidades agroecológicas del amaranto

Las variables que se emplearon fueron los requerimientos agroclimáticos del amaranto en México (Ruiz et al., 2013); específicamente, de temperatura media, altitud, precipitación, luminosidad y suelo (Cuadro 1). Para su definición se tomó información agroclimática de fuentes bibliográficas (FAO, 2020; Reina, 1990; Ruiz et al., 2013) y bases de datos como la de Ecocrop, que dispone de más de dos mil especies vegetales. También se consideró la opinión de algunos expertos en el cultivo.

Base de datos de las condiciones agroclimáticas

Se consultaron bases de datos geográficos de México. Para las condiciones edáficas se consultó la Base de Referencia Mundial de Recursos del Suelo (IUSS, 2015) en formato vectorial (FAO, 1997) en escala 1:250,000. La herramienta empleada para los datos climatológicos fue WorldClim versión 2.0 (WorldClim, 2022), concretamente para temperatura media y precipitación en el ciclo de cultivo de amaranto. Del Instituto Nacional de Estadística y Geografía se adquirió el Modelo Digital de Elevación con datos de tres segundos de valores de latitud (INEGI, 2020). De la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, a través de su Geoportal, se obtuvieron los mapas de la pendiente, manglares, áreas urbanas, cuerpos de agua y áreas rurales de México, también los mapas de áreas naturales protegidas en formato vectorial con una

resolución de 1:1,000,000 (CONABIO, 2024).

Procesamiento de la base de datos

El procedimiento consistió en clasificar los atributos climáticos y edáficos requeridos bajo condiciones de temporal para amaranto. El formato vectorial de donde se obtuvieron los datos (entidades asociadas a cada atributo) con caracteres propios espaciales y la geometría del atributo, se empleó para realizar análisis, interpolaciones, cortes e intersecciones. Dicha geometría de datos vectoriales se llevó a cabo a través de la intercepción de las capas edáficas y climáticas, después se eliminaron las zonas de manglares, las áreas protegidas y los asentamientos urbanos y rurales. Toda la información se procesó y reclasificó utilizando el software QGIS 3.22.14 Batioweiza (QGIS Development Team, 2022).

Las zonas potenciales se clasificaron en zonas de alto potencial, donde todas las variables agroclimáticas consideradas se combinan para que las condiciones del cultivo sean óptimas; zonas de potencial medio, donde más de una variable de clima y suelo presentan una condición subóptima (el intervalo es menor al óptimo pero superior al no apto), y las zonas no aptas, donde todas las condiciones son limitantes para el desarrollo del cultivo, por lo que resulta inadecuado utilizar esas áreas. Con esta información se elaboraron mapas del país para temperatura, precipitación, intensidad lumínica, suelos y áreas potenciales.

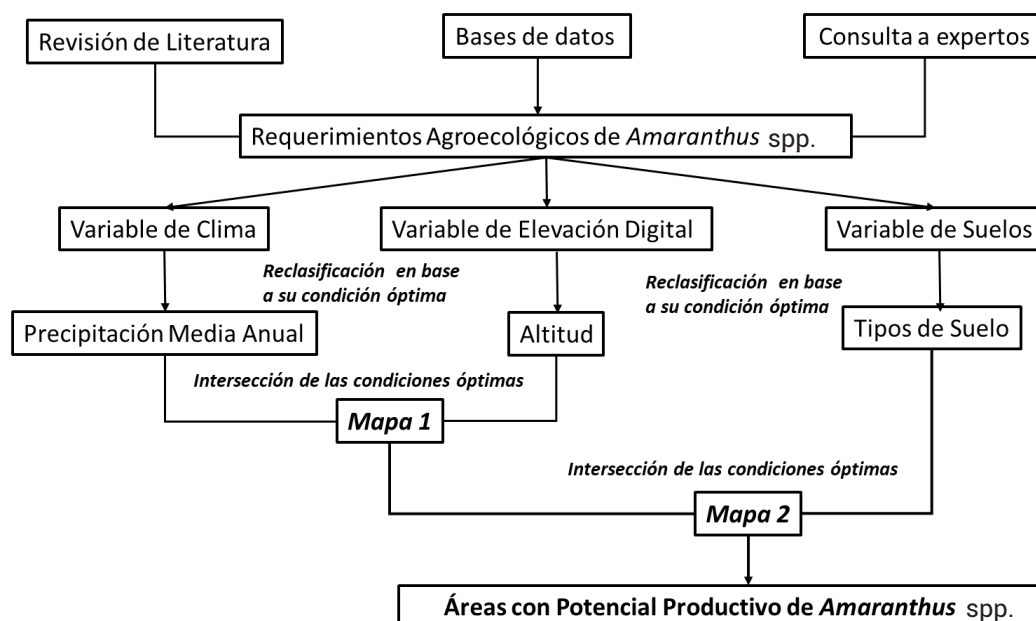


Figura 1. Modelo metodológico utilizado para determinar el potencial productivo del amaranto en México.

Cuadro 1. Requerimientos agroecológicos del amaranto en condiciones de temporal.

Variable	Unidades	Condición óptima	Condición subóptima	Condición no apta
Temperatura media anual	°C	12-24	10-12 24-28	Menor de 10 Mayor de 28
Altitud	msnm	200-2500	0-200, 2500-3000	Mayor de 3000
Precipitación Media Anual	mm	600 a 1500	< de 400 a 600 > de 1500 a 2000	Menor de 400 Mayor de 2000
Suelo	Tipo	Andosoles Chernozem Fluvisoles Kastañozems Luvisoles Nitisoles Feozem Regosoles	Cambisoles Acrisoles	Arenosoles Gleysoles Vertisoles Solonchaks Leptosoles Calcisoles Planosoles
pH	Indicador	6 a 7	5.5 a 5.9 7.1 a 8.0	Menor de 5.5 Mayor de 8.0
Textura	Tipo	Franco-arenoso Franco-limoso	Franco-arenoso Franco-limoso	Arcilloso Arenoso
Drenaje	Tipo	Buen drenaje	Drenaje regular	Muy Deficiente con encharcamientos
Horas Luz al año	Número	Mayor de 2500	2000 a 2500	Menor de 2000

RESULTADOS

Áreas potenciales

Las zonas con potencial para el cultivo de amaranto y su distribución se muestran en la Figura 2. En las áreas de mayor potencial el rendimiento esperado oscila entre 1.60 y 3.00 t ha⁻¹. Las regiones donde interactúan condiciones subóptimas de suelo, relieve y clima, con ciertas limitaciones para el cultivo, están marcadas en color rojo, con un rendimiento esperado de entre 1.00 y 1.59 t ha⁻¹.

Según los resultados obtenidos, la República Mexicana cuenta con 7,621,722 hectáreas de alto potencial para el cultivo de amaranto en 26 de los 32 estados, y 1,054,665 hectáreas de mediano potencial en 17 entidades federativas (Figura 2). Los estados con las mayores extensiones de alto potencial son Jalisco, que representa 19.2 % de la superficie total, seguido de Michoacán con 10.7 %, el Estado de México con 8.9 %, Oaxaca con 8.3 % y Puebla con 6.6 %. En conjunto, estos cinco estados concentran más del 50 % de la superficie de alto potencial para la producción de amaranto en condiciones de temporal (Cuadro 2).

DISCUSIÓN

Las zonas de alto potencial para el cultivo de amaranto en México superan ampliamente la superficie actualmente sembrada, que según datos del SIAP (2023), asciende a 3350 hectáreas, concentradas en seis estados. Por el contrario, los análisis realizados revelan que el país cuenta con 7,621,722 hectáreas de alto potencial para este cultivo, distribuidas en 26 de las 32 entidades federativas; además, se han identificado 1,064,665 hectáreas de mediano potencial en 17 estados, lo que resalta la amplia capacidad de expansión para este cultivo en México.

Si bien, el amaranto es un cultivo reconocido por su tolerancia inherente a condiciones climáticas adversas como sequía, altas temperaturas e intensidades de luz (Alemayehu *et al.*, 2015), características que le permiten adaptarse a una amplia gama de condiciones ambientales (Pulvento *et al.*, 2015), en México la siembra de este cultivo solo se realiza en seis estados del centro del país, siendo el estado de Puebla el principal productor de este cultivo, con una superficie sembrada de 1813 hectáreas, lo que representa el 63 % a nivel nacional (SIAP, 2023),

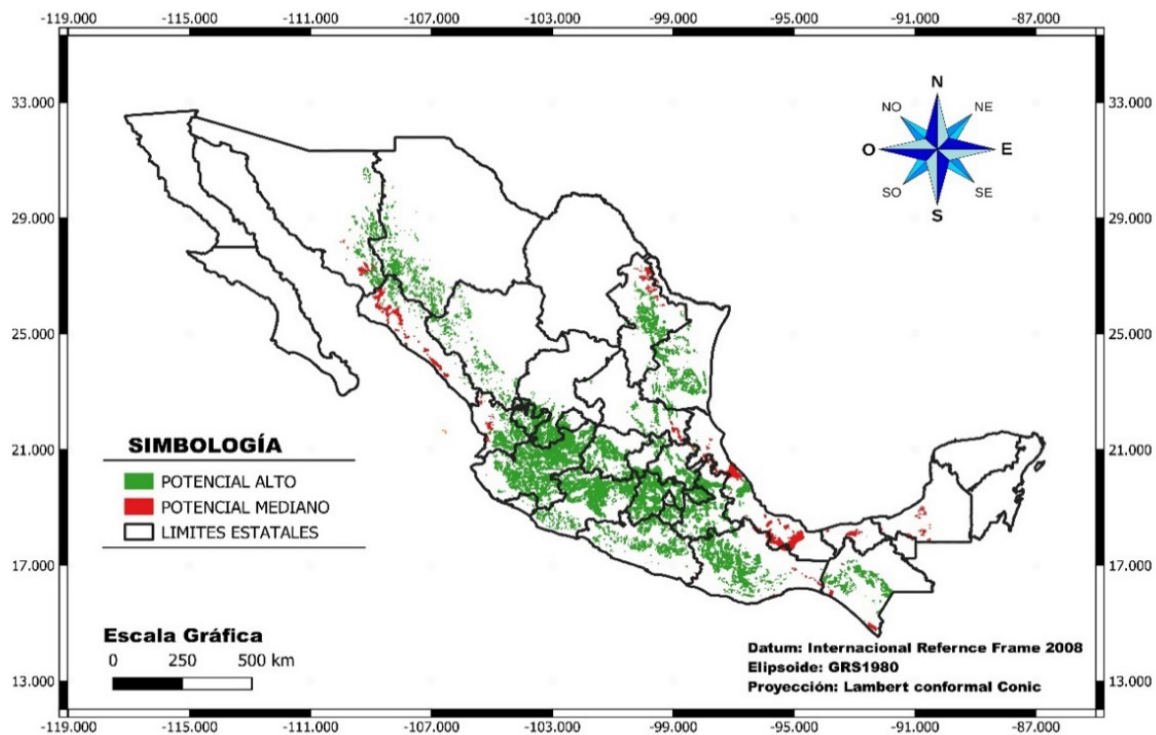


Figura 2. Distribución de las zonas de alto y mediano potencial para el cultivo de amaranto en México para condiciones de temporal.

concentradas en el municipio de Tochimilco, que cuenta con 1130 hectáreas dedicadas al cultivo de amaranto (SIAP, 2023), esta región se encuentra a una altitud de 2060 msnm y registra una temperatura media anual de 12 a 18 °C (INEGI, 2020). Estas características lo posicionan como una región representativa para este cultivo; sin embargo, el presente estudio va más allá al identificar y caracterizar áreas adicionales con condiciones agroclimáticas favorables para la producción de amaranto. Se establecieron como intervalos óptimos altitudes entre 200 y 2500 msnm, precipitaciones anuales de 600 a 1500 mm y temperaturas promedio de 12 a 24 °C. Bajo estos criterios, los estados con las mayores extensiones de alto potencial para la producción de amaranto en condiciones de temporal son Jalisco, Michoacán, Estado de México, Oaxaca y Puebla. Es importante destacar que las zonas identificadas como de alto y mediano potencial coinciden con los estados donde actualmente se realiza la siembra comercial de amaranto, como lo reportaron Espitia *et al.* (2018); sin embargo, aunque estados como Jalisco y Michoacán cuentan con las mayores áreas potenciales para la producción de amaranto, hasta la fecha no se registran siembras comerciales en estas regiones. Este panorama resulta especialmente relevante, dado que la demanda de amaranto está en aumento, impulsada por sus propiedades nutritivas y su contribución económica

para los productores (Reyes *et al.*, 2024). En este contexto, el presente estudio proporciona herramientas valiosas para la toma de decisiones estratégicas, promoviendo la expansión de este cultivo hacia áreas con condiciones óptimas y maximizando su adaptación, desarrollo y productividad.

CONCLUSIONES

Existen condiciones agroecológicas óptimas para producir amaranto bajo condiciones de temporal y mejorar su productividad en la República Mexicana. Las zonas de alto potencial productivo se localizan en 26 de los 32 estados de la república. Los estados con mayores superficies aptas para la producción de amaranto bajo condiciones de temporal son Jalisco, Michoacán, Estado de México, Oaxaca, Puebla y Guanajuato. En estas entidades se concentra más del 50 % de las 7,621,722 hectáreas identificadas con alto potencial productivo.

BIBLIOGRAFÍA

Aderibigbe O. R., O. O. Ezekiel, S. O. Owolade, J. K. Korese, B. Sturm and O. Hensel (2022) Exploring the potentials of underutilized grain amaranth (*Amaranthus* spp.) along the value chain for food and nutrition security: a review. *Critical Reviews in Food*

Cuadro 2. Superficie en hectáreas con alto y mediano potencial para el cultivo de amaranto en México.

Estado	Potencial alto (ha)	Potencial mediano (ha)	Total (ha)
Aguascalientes	48,046	0	48,046
Campeche	0	25,734	25,734
Chiapas	194,416	40,610	235,026
Chihuahua	176,653	7	176,660
Coahuila	108	0	108
Colima	36,931	0	36,931
Ciudad de México	11,645	0	11,645
Durango	80,103	0	80,103
Estado de México	679,022	0	679,022
Guanajuato	428,773	0	428,773
Guerrero	241,664	354	242,018
Hidalgo	331,535	5,610	337,145
Jalisco	1,516,581	61	1,516,642
Michoacán	816,466	0	816,466
Morelos	113,105	133	113,238
Nayarit	230,380	24,519	254,899
Nuevo León	223,116	29,191	252,307
Oaxaca	632,602	104,574	737,176
Puebla	505,443	42,701	548,144
Querétaro	153,348	0	153,348
San Luis Potosí	67,994	27,760	95,754
Sinaloa	38,384	164,474	202,858
Sonora	111,696	33,830	145,526
Tabasco	0	51,592	51,592
Tamaulipas	272,966	7,516	280,482
Tlaxcala	219,334	0	219,334
Veracruz	127,512	495,999	623,511
Zacatecas	363,899	0	363,899
Total	7,621,722	1,054,665	8,676,387

- Science and Nutrition* 62:656-669, <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1825323>
- Alemayehu F. R., M. A. Bendevis and S. E. Jacobsen (2015) The potential for utilizing the seed crop amaranth (*Amaranthus* spp.) in East Africa as an alternative crop to support food security and climate change mitigation. *Journal of Agronomy and Crop Science* 201:321-329, <https://doi.org/10.1111/jac.12108>
- Arias G. A. J. y R. González B. (2016) Análisis espacio temporal de la piezometría en el acuífero de Irapuato-Valle de Santiago. *Jóvenes en la Ciencia* 2:6-10.
- Caselato-Sousa V. M. and J. Amaya-Farfán (2012) State of knowledge on amaranth grain: a comprehensive review. *Journal of Food Science* 77:R93-R104, <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02645.x>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2024) Portal de Información Geoespacial. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Noviembre 2024).
- Dabija A., M. E. Ciocan, A. Chetariu and G. G. Codină (2022) Buckwheat and amaranth as raw materials for brewing, a review. *Plants* 11:756, <https://doi.org/10.3390/plants11060756>
- Espitia R. E., C. Mapes S., D. López E., M. De la O O., P. Rivas V., G. Martínez T., ... y J. M. Hernández C. (2010) Conservación y Uso de los Recursos Genéticos de Amaranto en México. INIFAP. Celaya, Guanajuato, México. 200 p.
- Espitia R. E., A. V. Ayala G., P. Rivas V., D. Escobedo L., L. González M., M. G. Valverde R. y L. F. Sesma H. (2018) Guía para la producción de amaranto en la Mesa Central de México. Desplegable para productores No. 2. Campo Experimental Valle de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Coatlincán, Texcoco, Estado de México. 2 p.
- Espitia-Rangel E., E. C. Mapes-Sánchez, C. A. Núñez-Colín y D. Escobedo-López (2010) Distribución geográfica de las especies cultivadas de *Amaranthus* y de sus parientes silvestres en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:427-437.
- Espitia-Rangel E., E. Martínez-Cruz, A. A. Lozano-Grande, R. Hortelano-Santa Rosa, M. Valverde-Ramos y F. Sesma-Hernández (2022) Calidad panadera y galletera de mezclas de harina integral de amaranto y refinada de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 13:1433-1443, <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i8.3162>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (1997) Zonificación Agro-ecológica. Guía General. Boletín de Suelos de la FAO 73. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. 94 p.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020) Ecocrop, database of crop constraints and characteristics. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. <https://gaez.fao.org/pages/ecocrop> (June 2024).
- Flores B. D. G. A. y S. Ríos E. (2021) El agroturismo como estrategia de diversificación de la cadena agroalimentaria del amaranto en Nativitas (Tlaxcala, México). *Turismo y Sociedad* 28:23-37, <https://doi.org/10.18601/01207555.n28.01>
- García N. H., J. López B., R. Moreno S., M. L. Villers R. y R. R. García D. (1999) Potencial agrícola del distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato, México: Una aplicación del enfoque de límites de transición gradual (fuzzy) utilizando SIG. *Investigaciones Geográficas* 3869-83, <https://doi.org/10.14350/ig.59079>
- García-Pereyra J., C. G. S. Valdés-Lozano, E. Olivares-Saenz, O. Alvarado-Gómez, G. Alejandro-Iturbide, E. Salazar-Sosa y H. Medrano-Roldán (2009) Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus* spp.) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 78:53-60.
- García-Pereyra J., C. G. S. Valdés-Lozano, G. Alejandro-Iturbide, I. Villanueva Fierro, O. G. Alvarado Gómez (2011) Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en genotipos de amaranto (*Amaranthus* spp.). *Phyton-International Journal of Experimental Botany* 80:167-173.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020) México en cifras. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=21188#collapse-Resumen> (Noviembre 2024).
- IUSS, The International Union of Soil Sciences (2015) World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. World Soil Resources Reports No. 106. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. FAO. Rome, Italy. 40 p.
- Kahsay A., M. Haile, G. Gebresamuel and M. Mohammed (2018) GIS-based multi-criteria model for land suitability evaluation of rainfed teff crop production in degraded semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment* 4:1467-1486, <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0499-9>
- López-López A. y J. A. Alonso-Arenas (2019) El resurgimiento de la planta *Amaranthus* spp. como cultivo potencial para la nutrición humana. *RD-ICUAP* 5:1-16, <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2019.13.341>
- Mapes S. E. C. (2010) El amaranto (*Amaranthus* spp.) planta originaria de México. *AAPAUNAM Academia, Ciencia y Cultura* 4:217-222.
- Mapes S. E. C. (2015) El amaranto. *Ciencia* 66:8-15.
- Manassero C. A., M. C. Añón and F. Speroni (2020) Development of a high protein beverage based on amaranth. *Plant Foods for Human Nutrition* 75:599-607, <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00853-9>
- Medina G. G., J. A. Ruiz C., R. A. Martínez P. y M. Ortiz V. (1997) Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agricultura Técnica en México* 23:69-89.
- Pulvento C., A. Lavini, M. Riccardi, R. D'Andria and R. Ragab (2015) Assessing amaranth adaptability in a Mediterranean area of South Italy under different climatic scenarios. *Irrigation and Drainage* 64:50-58, <https://doi.org/10.1002/ird.1906>
- QGIS Development Team (2022) QGIS: a free and open source geographic information system. Open Source Geospatial Foundation Project. Zurich, Switzerland. <https://qgis.org> (June 2024).
- Reina T. T. (1990) Requerimientos climáticos para el cultivo del amaranto (*Amaranthus* spp.) en México. In: El Amaranto, su Cultivo y Aprovechamiento. A. Trinidad S., F. Gómez L. y G. Suarez R. (comps.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp:81-89.
- Reyes Y., O. Andrade, Y. R. Morales y K. C. Moreno (2024) Producción, agronomía y usos culinarios del *Amaranthus* spp. de Tochimilco, Puebla, México. *Revista Alimentos, Ciencia e Ingeniería* 31:1-15, <https://doi.org/10.31243/aci.v31i1.2256>
- Ruiz C. J. A., G. Medina G., I. J. González A., H. E. Flores L., G. Ramírez O., C. Ortiz T., ... y R. A. Martínez P. (2013) Requerimientos Agroecológicos de Cultivos. Libro Técnico No. 3. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Tepatlán de Morelos, Jalisco, México. 564 p.
- Sánchez K. y E. Navarrete (2017) Amaranto en México: viejas estrategias productivas y nuevos consumidores. *Investigaciones Sociales* 21:45-57, <https://doi.org/10.15381/is.v21i38.14213>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023) Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON 2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México, México. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430> (Noviembre 2024).
- Srivastava S., Y. N. Sreerama and U. Dharmaraj (2021) Effect of processing on squalene content of grain amaranth fractions. *Journal of Cereal Science* 100:103218, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103218>
- Stetter M. G., T. Müller and K. J. Schmid (2016) Genomic and phenotypic evidence for an incomplete domestication of South American grain amaranth (*Amaranthus caudatus*). *Molecular Ecology* 26:871-886, <https://doi.org/10.1111/mec.13974>
- Vázquez R. R. (2017) Uso de sistemas de información geográfica libres para la protección del medio ambiente. Caso de estudio: manipulación de mapas ráster con datos climáticos. *Universidad y Sociedad* 10:158-164.
- Venskutonis P. R. and P. Kraujalis (2013) Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: a review on composition, properties, and uses. *Comprehensive Reviews in Food Science*

- and Food Safety* 12:381-412, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12021>
- WorldClim (2022)** Historical climate data México. WorldClim. Geneva, Switzerland. <https://WorldClim.org/data/worldclim21.html> (November 2024).
- Wu X. and M. W. Blair (2017)** Diversity in grain amaranths and relatives distinguished by genotyping by sequencing (GBS). *Frontiers in Plant Science* 8:1960, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01960>