VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

El maíz: alimento, recurso, patrimonio y papel en la salud mental

Jennifer Centeno Sánchez[1,2], Brandon Salvador Pacheco Ávila[1,3], Alejandra Mercado Mosqueda[1,4], Reyna Nallely Sánchez González[5], *Esther Juárez Cortes[1,6] y *José Vicente Negrete Díaz[1,3].

[1]Laboratorio de Plasticidad Cerebral y Neurociencia Integrativa, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, México., [2]Programa de Licenciatura en Ingeniería en Biotecnología, Departamento de Ingenierías, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, México, [3]Programa de Licenciatura en Psicología Clínica, Departamento de Ciencias de la Salud, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, México, [4]Programa de Licenciatura en Nutrición, Departamento de Ciencias de la Salud, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya- Salvatierra, Universidad de Guanajuato, [5]Laboratorio Ciencias Básicas, Sede Mutualismo, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, [6]Programa de Licenciatura en Fisioterapia, Departamento de Ciencias de la Salud, División de Ciencias de la Salud e Ingenierías, Campus Celaya-Salvatierra, Universidad de Guanajuato, México. jv.negrete@ugto.mx, esther.juarez@ugto.mx Autores de correspondencia*.

Resumen

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor trascendencia histórica, económica y nutricional a nivel mundial. El objetivo de este artículo de divulgación es mostrar una síntesis sobre el origen y la diversidad del maíz, su diversidad genética, sus propiedades nutricionales y su impacto en la salud mental. Datos históricos indican que la domesticación del maíz ocurrió en Mesoamérica hace aproximadamente 8700 a 9000 años a partir del teosinte (antecesor del maíz moderno). Actualmente se reportan 64 variedades de maíz en México, donde destacan las nativas y pigmentadas como el azul, morado y negro, los cuales poseen una alta concentración de compuestos fenólicos y antocianinas. Por otro lado, se destacan métodos de procesamiento del maíz como la nixtamalización, que permite optimizar su calidad y mejorar la digestibilidad de este grano. En cuanto a su papel en la salud mental, las antocianinas presentes en algunos maíces pigmentados han mostrado, en estudios experimentales, poseer actividad antioxidante y antiinflamatoria, de ahí que se cuente con poca evidencia para atribuir al consumo de maíz un efecto terapéutico directo sobre la salud mental.

Palabras clave: maíz, maíces pigmentados, nutrición, neuroprotección, salud mental

Introducción

Pocos cultivos han ejercido una influencia tan profunda en el desarrollo de las sociedades como el maíz (*Zea mays L.*). Desde su origen en Mesoamérica hasta su consolidación como uno de los cereales más producidos y consumidos a nivel mundial, esta especie ha desempeñado un papel fundamental en los ámbitos alimentario, económico, cultural y científico. Su extraordinaria diversidad genética, resultado de milenios de domesticación, selección y adaptación a distintos ambientes, ha permitido el desarrollo de numerosas variedades con un elevado valor agronómico, nutricional y biológico (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2024; Food and Agriculture Organization [FAO], 2024).

En las últimas décadas, los avances en genética, genómica y biotecnología han ampliado significativamente el conocimiento sobre este cultivo y han impulsado nuevas estrategias de mejoramiento genético. Al mismo tiempo, estos avances han generado importantes debates en torno a los organismos genéticamente modificados, la bioseguridad y la conservación de la biodiversidad. En este contexto, el presente artículo de revisión sintetiza la evidencia científica e institucional seleccionada sobre el origen y la diversidad del maíz, los avances en genética y transgénicos, su importancia nutricional, económica y cultural, así como el marco normativo que regula su investigación, producción y aprovechamiento, con el propósito de ofrecer una visión integral de uno de los cultivos más relevantes para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible (Liu et al., 2019; Fan et al., 2024).

Historia del maíz y domesticación

El maíz ha sido uno de los alimentos más relevantes a lo largo de la historia en términos de nutrición humana, principalmente por su origen en los pueblos nativos mesoamericanos y las primeras sociedades agrícolas de América. Muchas evidencias arqueológicas y genéticas revelan que su domesticación tuvo lugar dentro del territorio que ahora representa México, a partir del teosinte, específicamente *Zea mays ssp. parviglumis*, una hierba silvestre que se distribuye en partes del suroeste de México, un hábitat nativo en la cuenca del río Balsas (CONABIO, 2022). A diferencia del maíz que consumimos hoy, el teosinte tenía una estructura más ramificada, mazorcas pequeñas y granos duros, por lo que el surgimiento del maíz cultivado no fue un cambio repentino, sino el resultado de un proceso de selección a largo plazo llevado a cabo por comunidades que conservaron y seleccionaron plantas con características favorables para la cosecha, el consumo y el almacenamiento (Piperno et al., 2009; Ranere et al., 2009).

Como ya se menciona, la domesticación no ocurrió de la noche a la mañana, sino que fue un proceso que tomó miles de años. Esto se sabe gracias a los restos arqueobotánicos como los granos de almidón y fitolitos que se descubrieron en herramientas de molienda y sedimentos arqueológicos, los cuales indican que el primer uso del maíz pudo haberse realizado entre aproximadamente 8,700 y 9,000 años. Estos descubrimientos dan una pista del hecho de que el maíz cultivado surgió mediante un proceso gradual de selección llevada a cabo por el humano, a partir del teosinte, y no como resultado de un cambio repentino, de ese modo el maíz se reproducía y gradualmente se convirtió en la variedad cultivada que hoy conocemos (Piperno et al., 2009; Stitzer & Ross-Ibarra, 2018).

El maíz continuó creciendo en otros lugares de América, expandiéndose y adaptándose a nuevos entornos climáticos, geográficos y culturales. Tras la domesticación en México, estudios genómicos han sugerido que algunas de las variedades iniciales de maíz viajaron a Centroamérica y Sudamérica, donde desarrollaron procesos de selección regional y adaptación local. La historia evolutiva fue bastante complicada, y favoreció la aparición de variantes, algunas con diferentes dimensiones de mazorca, forma, textura de grano, coloración, composiciones químicas y usos alimentarios (Kistler et al., 2018). Por esta razón, el maíz no puede considerarse estrictamente como una especie de planta domesticada, sino como un cultivo cuya diversidad es el resultado de milenios de interacción entre biología, nutrición, agricultura y cultura.

Variedades del maíz

El maíz se cultiva en muchos lugares y hay muchas variedades disponibles para diferentes condiciones de cultivo. Su amplia variedad es el resultado de una larga domesticación, adaptación a diversos climas y selección por parte de los agricultores a lo largo de los años. En México, el maíz se cultiva en áreas que van desde cálidas y húmedas hasta regiones templadas, laderas, valles fértiles y áreas con baja precipitación, lo que ha favorecido la conservación de muchas variedades locales (Caldu-Primo et al., 2017). La diversidad del maíz ha sido descrita como un fenómeno heterogéneo durante décadas, dando las 64 razas de maíz reportadas en México (CONABIO, 2020), de las cuales se estima que 59 son variedades nativas, organizadas en siete complejos raciales basados en características morfológicas, genéticas, ecológicas y de adaptación. Esta variabilidad no es inherentemente estática, ya que el maíz es de polinización abierta y los agricultores conservan, intercambian y seleccionan semillas basándose en sus intereses alimentarios, productivos y culturales. Los tipos de maíz pueden considerarse según algunos criterios, incluyendo la forma de la mazorca, el tamaño del grano, la textura del endospermo, la región de cultivo o el uso para alimentos. Esta diversidad abarca maíces dentados, harinosos, cristalinos, reventadores, dulces y cerosos, entre otros, cuyas propiedades específicas dictan cómo se utilizan. Algunos de ellos se utilizan esencialmente para tortillas, tamales, atoles o pinoles, mientras que muchos de ellos están destinados al consumo animal, la producción industrial u otros productos como las palomitas de maíz. Sin embargo, en el caso mexicano, las clasificaciones basadas en variedades son beneficiosas para estudiar y preservar la diversidad del cultivo, aunque esto no significa divisiones rígidas, ya que los ejemplares de una misma variante pueden diferir en color, forma de la mazorca, textura del grano y adaptación local (Perales & Golicher, 2014).

La variabilidad indica que el maíz se diversifica no solo por circunstancias naturales, sino también por las prácticas agrícolas y culturales de las comunidades con las que ha sido cultivado. El color del grano es una de las características más evidentes de esta diversidad. Aunque el maíz blanco y amarillo son los más reconocidos por sus usos alimentarios e industriales, también existen variedades rojas, azules, moradas y

negras. Los colores se atribuyen principalmente a compuestos fenólicos, como las antocianinas, pigmentos naturales presentes en estructuras como el pericarpio, la aleurona o la mazorca. En los maíces pigmentados, la composición y concentración de estos compuestos pueden diferir según la variedad, el entorno de cultivo y el procesamiento del grano. Por lo tanto, el color no solo tiene un significado estético o cultural, sino que también está asociado con propiedades químicas específicas, lo que ha llamado la atención de la investigación nutricional en maíces (Magaña-Cerino et al., 2020).

Entre los maíces pigmentados se encuentran los maíces azules, morados y negros. Estos tipos de maíz se han empleado tradicionalmente en una variedad de productos alimenticios. En México se pueden encontrar en todas partes, desde tortillas hasta tlacoyos, así como atoles y otros alimentos regionales; mientras que el maíz morado y negro han adquirido interés comercial por su uso tradicional y por la demanda de alimentos con pigmentos naturales y compuestos bioactivos. La apariencia azul, morada o negra depende de la concentración y localización de antocianinas y otros compuestos fenólicos en el grano. Aunque este tipo de maíz se produce menos que los maíces blancos y amarillos, todavía tiene mucho potencial en la agrobiodiversidad mexicana y como un alimento alternativo no limitado a variedades convencionales. La conservación de tales variedades depende en gran medida de la preservación de las semillas por parte de los agricultores a través de los métodos tradicionales de selección genética y cultivo (Esquivel & Massieu Trigo, 2023). Muchas comunidades dependen del sabor, la textura, la resistencia a diversas circunstancias ambientales, el tiempo de maduración y su valor culinario para hacer la selección. Por esta razón, los maíces nativos son tan importantes no solo para la agricultura, sino también para la alimentación diaria y como parte de la firma cultural de una comunidad. Esta diversidad en el maíz, particularmente en sus variedades pigmentadas, contribuye a la comprensión de que no hay un cultivo homogéneo, sino que este cultivo representa una vasta riqueza biológica, una constitución genética diversa, abundantes recursos nutricionales y un rico significado social que se basa en largos períodos de interconexiones y diálogos cruzados en una variedad de entornos (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2010).

Impacto del maíz en la alimentación mundial

El maíz es uno de los cereales más importantes para el suministro alimentario global, junto con el trigo y el arroz. La importancia de esta mercancía no solo se basa en su cantidad de producción, sino también en la heterogeneidad de sus aplicaciones agrícolas. Según la FAO (2024), el crecimiento de la producción mundial de cereales registrado en 2023 estuvo impulsado principalmente por el maíz, aunque junto con el trigo y el arroz también constituyeron los principales cultivos de mayor producción en el mundo (FAO, 2024). En México, el maíz se asocia principalmente al consumo humano, sin embargo, a nivel global su uso es más amplio, desempeñando un papel importante como alimento base para el ganado, en sistemas de producción de carne, leche y huevos; además de una materia prima para la obtención de biocombustible. Como sugieren las proyecciones de la OCDE (Organisation for Economic Cooperation and Development) y la FAO, se estima que el consumo mundial de maíz aumente en la próxima década, principalmente debido a la mayor demanda de alimento para ganado y aves de corral, mientras que el uso directo como alimento seguirá siendo importante en regiones donde el maíz blanco se considera un alimento básico, incluidas áreas con grandes comunidades consumidoras de este grano en África subsahariana y América Latina (OCDE/FAO, 2025).

Esto indica que el maíz no solo es un alimento básico, sino un cultivo alimenticio que contribuye a cadenas alimentarias más grandes. En términos nutricionales, el maíz proporciona energía predominantemente en forma de almidón, junto con pequeñas cantidades de proteínas, fibra, lípidos, vitaminas y minerales. Su valor como alimento también está ligado a cómo se procesa y se consume, ya que consumir grano entero, harina, tortilla, cereal refinado o productos industrializados representa distintos valores nutrimentales. En este sentido, la nixtamalización, que consiste en cocer el grano en una solución alcalina, generalmente con hidróxido de calcio; facilita la elaboración de masa, y tiene un papel importante en el caso de México y múltiples países de Mesoamérica, ya que mejora algunos aspectos nutricionales específicos del grano y facilita la preparación de alimentos tradicionales como tortillas, tamales y atoles (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2010). Por consiguiente, el impacto del maíz va más allá de su medición en toneladas, reflejándose en la vida diaria, ya que su uso y consumo depende de la cultura. El maíz es importante en el debate sobre la seguridad alimentaria porque los factores ambientales, económicos y políticos afectan su producción y disponibilidad, por ejemplo, pueden depender de la adaptación al clima, la gestión eficiente del agua y la conservación de la diversidad genética (OCDE/FAO, 2025). En este contexto, es importante señalar que las variedades nativas y pigmentadas en esta situación ganan importancia

adicional, no solo por su valor nutricional, sino también como componentes de la variedad agrícola que pueden ayudar a sostener sistemas agrícolas más flexibles ante los cambios en el medio ambiente.

Genética del maíz

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los organismos modelo más importantes para el estudio de la genética vegetal debido a la complejidad de su genoma, su elevada variabilidad genética y su relevancia agrícola. Desde principios del siglo XX, este cultivo ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la genética moderna, permitiendo comprender procesos como la herencia mendeliana, la recombinación cromosómica, la regulación de la expresión génica y la acción de los elementos transponibles. En la actualidad, el conocimiento generado a partir de la secuenciación del genoma y del desarrollo de herramientas de genómica funcional ha convertido al maíz en una de las especies vegetales mejor caracterizadas desde el punto de vista molecular, favoreciendo el diseño de estrategias de mejoramiento más precisas y eficientes (Liu et al., 2019; Feschotte, 2023).

El genoma de referencia B73 tiene aproximadamente 2.3 Gb, distribuidos en diez cromosomas, y está compuesto en gran proporción por elementos transponibles, los cuales representan cerca del 85% del ADN total (Schnable et al., 2009). Esta organización confiere una notable plasticidad genética y explica, en gran medida, la amplia diversidad fenotípica observada entre variedades nativas, híbridos comerciales y líneas de investigación (Liu et al., 2019). A diferencia de otros cereales, el maíz presenta una extraordinaria capacidad para generar nuevas combinaciones alélicas mediante recombinación, fenómeno que ha favorecido tanto su adaptación a distintos ambientes como su aprovechamiento en programas de mejoramiento genético (Bauer et al., 2013) .

La diversidad genética constituye uno de los recursos biológicos más valiosos del cultivo. A lo largo de miles de años de domesticación, selección natural y artificial, el maíz ha acumulado una gran cantidad de variantes genéticas responsables de diferentes características morfológicas, fisiológicas y agronómicas, como el rendimiento, la arquitectura de la planta, el contenido nutricional, la tolerancia al estrés hídrico y térmico, así como la resistencia a plagas y enfermedades. Esta diversidad representa la materia prima sobre la cual actúan los programas de mejoramiento, ya que permite identificar alelos favorables que posteriormente pueden incorporarse a nuevas variedades mediante cruzamientos convencionales o herramientas biotecnológicas (Fan et al., 2024).

Durante las últimas dos décadas, el estudio de la genética del maíz ha experimentado una transformación impulsada por el desarrollo de tecnologías de secuenciación de nueva generación (NGS), el fenotipado de alta precisión y el análisis masivo de datos biológicos. Estas herramientas han permitido identificar miles de marcadores moleculares distribuidos a lo largo del genoma, facilitando la localización de regiones asociadas con caracteres de importancia agronómica mediante estudios de asociación del genoma completo (*Genome-Wide Association Studies*, GWAS) y análisis de loci de caracteres cuantitativos (QTL). Como resultado, hoy es posible comprender con mayor precisión la arquitectura genética de características complejas controladas por múltiples genes y su interacción con el ambiente (Liu y Qin, 2021).

El conocimiento generado por la genómica ha transformado también las estrategias de mejoramiento vegetal. Tradicionalmente, la selección de plantas dependía de la evaluación fenotípica realizada durante varios ciclos de cultivo; sin embargo, la incorporación de marcadores moleculares ha permitido seleccionar individuos portadores de genes favorables desde etapas tempranas del desarrollo, reduciendo considerablemente el tiempo requerido para obtener nuevas variedades. Posteriormente, la selección genómica amplió este enfoque al utilizar información proveniente de miles de marcadores distribuidos por todo el genoma para predecir el desempeño agronómico de un individuo, incrementando la precisión en la selección de caracteres complejos como el rendimiento, la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia a condiciones ambientales adversas (Crossa et al., 2017).

El mejoramiento moderno integra información genómica, fenotípica y ambiental con herramientas computacionales para predecir el desempeño de nuevas líneas. Este paradigma permite analizar grandes volúmenes de información genómica y ambiental de manera simultánea, favoreciendo la predicción del comportamiento de nuevas líneas antes de su evaluación en campo. La incorporación de estas herramientas representa uno de los avances más importantes en la agricultura moderna, ya que acelera significativamente

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

el desarrollo de cultivares adaptados a los efectos del cambio climático y a las crecientes demandas de producción de alimentos (Varshney et al., 2020).

Otro aspecto relevante de la genética del maíz consiste en la identificación y caracterización de genes implicados en procesos fisiológicos esenciales. Diversas investigaciones recientes han descrito genes asociados con la arquitectura de la planta, el desarrollo de la mazorca, la eficiencia fotosintética, el metabolismo del almidón, la calidad nutricional del grano y la respuesta frente a condiciones de sequía, altas temperaturas y deficiencia de nutrientes. El conocimiento de estos mecanismos moleculares no solo amplía la comprensión de la biología del cultivo, sino que también proporciona nuevas oportunidades para desarrollar variedades más productivas, resilientes y sostenibles mediante estrategias de mejoramiento convencional y biotecnológico (Fan et al., 2024; Xiao et al., 2019).

Maíz transgénico

El desarrollo de la ingeniería genética marcó un punto de inflexión en el mejoramiento vegetal al permitir la incorporación dirigida de genes de interés en el genoma de las plantas, superando las limitaciones del mejoramiento convencional basado exclusivamente en la recombinación genética entre individuos compatibles. En el caso del maíz, esta tecnología ha posibilitado la obtención de variedades con características específicas de importancia agronómica, entre ellas la resistencia a insectos, la tolerancia a herbicidas, la adaptación a condiciones ambientales adversas y la mejora de determinados atributos nutricionales. En consecuencia, el maíz transgénico constituye uno de los ejemplos más representativos de la aplicación de la biotecnología moderna en la agricultura (Gao, 2021).

Un organismo genéticamente modificado (OGM) se define como aquel cuyo material genético ha sido alterado mediante técnicas de ingeniería genética que permiten introducir, eliminar o modificar secuencias de ADN de manera controlada. En el maíz, la transformación genética se realiza principalmente mediante dos estrategias: la mediada por *Agrobacterium tumefaciens* y la biobalística o bombardeo de micropartículas. La primera aprovecha la capacidad natural de esta bacteria para transferir ADN al genoma vegetal, mientras que la segunda utiliza partículas microscópicas recubiertas con ADN que son aceleradas hacia las células vegetales. Tras la transformación, las células modificadas se regeneran *in vitro* hasta obtener plantas completas capaces de transmitir el transgén de forma estable a las siguientes generaciones (Gao,2021).

Los primeros eventos comerciales de maíz transgénico fueron desarrollados para conferir resistencia a insectos mediante la incorporación de genes provenientes de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt), los cuales codifican proteínas insecticidas con alta especificidad contra diversas especies de lepidópteros y coleópteros que afectan significativamente la producción agrícola. Posteriormente, se desarrollaron variedades tolerantes a herbicidas como el glifosato y el glufosinato de amonio, facilitando el manejo de malezas y optimizando diversas prácticas agrícolas. En la actualidad predominan los denominados eventos apilados (*stacked events*), que combinan múltiples características en una misma variedad, como resistencia a insectos, tolerancia a herbicidas y rasgos relacionados con la adaptación al estrés ambiental (ISAAA, 2026).

La incorporación de caracteres transgénicos ha generado beneficios agronómicos ampliamente documentados. Diversos estudios reportan reducciones significativas en las pérdidas ocasionadas por insectos plaga, una menor dependencia del uso de insecticidas químicos y una mayor estabilidad en el rendimiento, particularmente en regiones donde la presión de plagas representa un factor limitante para la producción. De manera similar, la tolerancia a herbicidas ha permitido implementar estrategias de manejo más eficientes, favoreciendo sistemas de agricultura de conservación que reducen la erosión del suelo y optimizan el uso de recursos. Sin embargo, la magnitud de estos beneficios depende de las condiciones agroecológicas, el manejo agronómico y la aplicación adecuada de programas para prevenir la evolución de resistencia en insectos y malezas (Carrière et al., 2020).

A pesar de sus ventajas potenciales, el empleo de maíz transgénico continúa siendo objeto de debate científico, ambiental y social. Entre las principales preocupaciones destacan el flujo génico hacia poblaciones de maíz nativo, la posible aparición de organismos resistentes como consecuencia de una presión de selección continua, los efectos sobre organismos no objetivo y las implicaciones relacionadas con la conservación de la biodiversidad. Estas consideraciones han impulsado el establecimiento de protocolos de evaluación de riesgo que analizan cada evento transgénico de forma individual, considerando aspectos

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

moleculares, toxicológicos, nutricionales, ecológicos y agronómicos antes de autorizar su liberación comercial (OECD, 2023).

En relación con la inocuidad para el consumo humano y animal, los organismos internacionales coinciden en que los cultivos transgénicos autorizados han sido sometidos a rigurosas evaluaciones de bioseguridad antes de su comercialización. Las evaluaciones regulatorias de un cultivo genéticamente modificado consideran, entre otros aspectos su caracterización molecular, composición nutricional, toxicidad potencial, alergenicidad y equivalencia sustancial, y se realizan caso por caso, con respecto a sus contrapartes convencionales. No obstante, la comunidad científica reconoce que la evaluación debe mantenerse bajo un enfoque de caso por caso, debido a que cada evento transgénico posee características moleculares particulares que requieren una valoración independiente (FAO, 2022; OECD, 2023).

Durante los últimos años, el panorama del mejoramiento genético ha evolucionado con el desarrollo de herramientas de edición génica, particularmente aquellas basadas en el sistema CRISPR/Cas. A diferencia de la transgénesis clásica, estas tecnologías permiten modificar secuencias específicas del genoma con un elevado nivel de precisión e, incluso, generar plantas que no contienen ADN exógeno de manera permanente. Como resultado, la edición génica representa una nueva etapa en la biotecnología vegetal, con aplicaciones potenciales para incrementar el rendimiento, mejorar la calidad nutricional y fortalecer la tolerancia frente a enfermedades y condiciones ambientales adversas. Asimismo, este avance plantea nuevos desafíos regulatorios, ya que diversos países mantienen criterios diferentes para determinar si los organismos editados deben someterse a la misma regulación que los organismos transgénicos (Gao, 2021)

Valor económico del maíz

El maíz tiene una profunda relevancia económica, no sólo en referencia a su uso directo como alimento, sino también por su papel estratégico en las cadenas de valor globales, estando conectado con la ganadería, la industria de productos alimenticios, almidones, aceites, edulcorantes, biocombustibles, entre otros. Según la FAO, el incremento en la producción mundial de cereales en 2023 fue impulsado principalmente por el maíz, esto debido a los grandes volúmenes de cosecha y su versatilidad en el sector agrícola. Por lo tanto, este grano está estratégicamente posicionado ya que su demanda está relacionada con diversos sectores productivos en el comercio internacional.

Proyecciones de la OCDE y la FAO indican que para 2034, una parte sustancial de los cereales seguirá destinada al consumo humano, aunque el uso para alimentación animal y otros propósitos seguirá siendo central, especialmente en el caso del maíz y otros granos secundarios. En países como Estados Unidos, por ejemplo, el maíz se emplea principalmente como ingrediente energético para la alimentación animal, pero también se procesa en productos para la industria, como etanol, almidones, edulcorantes, aceites y derivados. Esta amplia gama de aplicaciones ayuda a explicar por qué el maíz tiene una fuerte presencia en un extenso abanico de mercados agrícolas y por qué alterar la producción, el precio o la disponibilidad del maíz puede afectar a varios sectores económicos (United States Department of Agriculture [USDA], 2026). En México, el maíz tiene un valor económico específico; no solo es el cultivo alimenticio más importante del país, sino que está estrechamente relacionado con el consumo diario y la producción de sus alimentos base y productos derivados (tortillas, masa, tamales) (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura [FIRA], 2024).

El SIAP registra información agrícola sobre superficie sembrada, superficie cosechada, volumen, rendimiento, precio rural promedio y valor de producción, reflejando la relevancia del maíz para el programa nacional de monitoreo agroalimentario (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2024). Esto se ve aún más reforzado por los maíces nativos y pigmentados (azul, rojo, morado y negro), los cuales son más probable que tengan producción local, pero que aún tienen una significativa importancia gastronómica, cultural y comercial en ciertos mercados. Así, el maíz representa un elemento de importancia económica global, nacional y comunitaria porque está incorporado en grandes operaciones agroindustriales y sistemas alimentarios tradicionales que han sido preservados y sostenidos a lo largo del tiempo.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Normatividad aplicable al maíz y a los organismos genéticamente modificados

El desarrollo de nuevas tecnologías para el mejoramiento genético del maíz ha incrementado la necesidad de establecer marcos regulatorios que garanticen un equilibrio entre la innovación científica, la productividad agrícola, la protección del ambiente y la salud pública. La regulación de los organismos genéticamente modificados (OGM) surge como respuesta a la necesidad de evaluar los posibles riesgos asociados con su liberación, cultivo, comercialización y consumo, mediante procedimientos científicos que permitan asegurar su inocuidad y minimizar impactos potenciales sobre la biodiversidad y los recursos fitogenéticos. En consecuencia, la normatividad constituye un componente indispensable para el desarrollo responsable de la biotecnología agrícola (Food and Agriculture Organization [FAO], 2022; Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2023).

A nivel internacional, uno de los principales instrumentos en materia de bioseguridad es el Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología, adoptado en el año 2000 como un acuerdo complementario al Convenio sobre la Diversidad Biológica. Su objetivo es establecer mecanismos que permitan garantizar un nivel adecuado de protección durante el movimiento transfronterizo, la manipulación y la utilización de organismos vivos modificados que puedan tener efectos adversos sobre la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica, considerando al mismo tiempo los posibles riesgos para la salud humana. Entre sus principios fundamentales destaca el enfoque precautorio, mediante el cual los países pueden adoptar medidas de protección aun cuando la evidencia científica disponible sea limitada (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2024).

Además del Protocolo de Cartagena, diversos organismos internacionales han desarrollado lineamientos para la evaluación de la seguridad de los cultivos transgénicos. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha establecido documentos de consenso sobre la composición del maíz, métodos de evaluación comparativa y criterios para la caracterización molecular de eventos transgénicos. Por su parte, la Comisión del Codex Alimentarius, creada por la FAO y la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha publicado principios y directrices para la evaluación de la inocuidad de los alimentos derivados de la biotecnología moderna, los cuales constituyen una referencia internacional para numerosos sistemas regulatorios (Codex Alimentarius Commission, 2023; OECD, 2023).

En México, la regulación de los organismos genéticamente modificados se fundamenta en un conjunto de disposiciones legales orientadas a proteger la biodiversidad y garantizar un uso seguro de la biotecnología. Históricamente, el principal instrumento fue la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM), publicada en 2005, la cual estableció los procedimientos para la investigación, liberación experimental, liberación piloto, liberación comercial, importación, exportación y comercialización de organismos genéticamente modificados. Esta legislación definió las competencias de distintas dependencias federales y establece mecanismos para la evaluación científica de riesgos ambientales y sanitarios.

Sin embargo, el marco regulatorio mexicano ha experimentado modificaciones importantes durante los últimos años como consecuencia de nuevas políticas públicas relacionadas con la protección del maíz nativo y la conservación de la biodiversidad. Entre ellas destaca el Decreto Presidencial publicado el 13 de febrero de 2023, mediante el cual se establecieron medidas para sustituir gradualmente el uso de maíz genéticamente modificado destinado a la elaboración de masa y tortilla para consumo humano, así como la eliminación progresiva del uso de glifosato en el territorio nacional. Estas disposiciones generaron un amplio debate científico, jurídico y comercial debido a sus implicaciones para la producción agrícola, el comercio internacional y la seguridad alimentaria, particularmente en el marco del Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC).

El marco regulatorio mexicano cambió sustancialmente durante 2025. El 5 de febrero, la Secretaría de Economía dejó sin efectos los artículos Sexto, fracción II, Séptimo y Octavo del Decreto de 2023, relacionados con la revocación de autorizaciones para determinados usos alimentarios y con la sustitución gradual del maíz genéticamente modificado destinado a la alimentación animal y al uso industrial para alimentación humana (Secretaría de Economía [SE], 2025). Posteriormente, el 17 de marzo se reformaron los artículos 4o. y 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. La reforma establece que el cultivo de maíz en el territorio nacional debe estar libre de modificaciones genéticas que superen las barreras naturales de la reproducción o la recombinación, como las transgénicas, mientras que cualquier otro uso del maíz

genéticamente modificado debe evaluarse conforme a las disposiciones legales aplicables (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2025).

La regulación del maíz transgénico en México también debe considerar que el país constituye el centro de origen y diversificación de *Zea mays*. Esta condición confiere una responsabilidad especial para la conservación de las variantes nativas y de la diversidad genética desarrollada durante miles de años mediante procesos de domesticación y selección realizados por comunidades campesinas e indígenas. En este contexto, la evaluación del flujo génico, la protección de los recursos fitogenéticos y la preservación de la diversidad biológica representan elementos centrales dentro de las políticas nacionales de bioseguridad (CONABIO, 2024).

A nivel internacional, los enfoques regulatorios presentan diferencias importantes. Mientras algunos países evalúan principalmente las características del producto final obtenido mediante biotecnología, otros regulan el proceso tecnológico utilizado para generarlo. Estas diferencias adquieren especial relevancia con el desarrollo de técnicas de edición génica, como *CRISPR/Cas,* cuya clasificación regulatoria continúa siendo objeto de discusión debido a que muchas de las modificaciones obtenidas pueden ser indistinguibles de aquellas originadas mediante mutaciones naturales o mejoramiento convencional. Como resultado, diversos organismos internacionales han iniciado procesos de actualización normativa para responder a los avances científicos sin comprometer la seguridad ambiental y alimentaria.

Maíz, cultura y sociedad

El maíz, además de ser un cultivo agrícola o un alimento básico, ha sido también parte integral de la vida cultural y social de los pueblos mesoamericanos. En México, está presente en la alimentación diaria, en la agricultura y en la formación de comunidades locales. CONABIO explica que el maíz está incluido en la dieta mexicana y, debido a su importancia nutricional, económica, política y social, es uno de los cultivos agrícolas más útiles en este país. También es más comprensible para nosotros notar que el maíz no es un cultivo único, sino que forma parte de sistemas tradicionales como la milpa, donde se estableció junto a otras especies (frijoles, calabaza y chile), un sistema de producción que integra alimentos, conocimiento campesino y manejo de la biodiversidad. La relación cultural del maíz también se manifiesta en su proceso de producción y hábitos alimenticios. La elaboración de tortillas, tamales, atoles, tlacoyos, pinoles y otros productos derivados cumple un propósito dietético y se consideran integrales a la identidad alimentaria de muchas poblaciones. La cocina tradicional mexicana ha sido reconocida por la UNESCO como patrimonio cultural inmaterial, y como resultado, los alimentos preparados, especialmente tortillas y tamales, son la característica principal no solo en la vida cotidiana sino también en festivales y ofrendas. Esto evidencia que esta semilla va más allá de su valor nutricional, representando aspectos familiares, rituales, económicos y comunitarios que han sido transmitidos durante miles de años. Un aspecto igualmente crítico es que la diversidad del maíz es gestionada por agricultores e individuos que mantienen las semillas nativas, eligiendolas en función del sabor, resistencia, color, textura, capacidad de germinación o uso. En consecuencia, esta selección responde no solo a criterios productivos, sino también a preferencias culturales y dietéticas para preservar variedades blancas, amarillas, azules, rojas, moradas y negras. Los maíces pigmentados son de especial importancia para esta investigación, ya que pertenecen a una diversidad biológica y cultural dentro del cultivo. Aunque en general son menos competitivos frente a los maíces comerciales, el uso de estos tipos para formulaciones tradicionales asegura su supervivencia en los mercados locales y dietas regionales.

Maíz y salud

El maíz se ha considerado como una fuente de energía principal en la dieta, esto debido a que su cultivo es rico en carbohidratos y está compuesto de almidón. No obstante, su valor nutritivo podría reducirse a su papel como fuente de energía si se restringiera al contenido de nutrientes como proteínas, lípidos, fibra dietética, vitaminas, minerales y varios nutrientes bioactivos. Shah et al. (2016) mencionan que el maíz puede proporcionar nutrientes esenciales para la nutrición humana, pero el tipo de grano, su variedad, procesamiento, forma y procedimientos de consumo varían en el contenido de nutrientes del mismo. De esta manera, el maíz entero o nixtamalizado tiene más valor nutricional que el maíz altamente procesado o refinado. Además, el grano está compuesto por diferentes estructuras, como el endospermo, el germen y el pericarpio donde se encuentran la fibra, las vitaminas y la mayoría de los antioxidantes, por lo que la molienda

y el refinado son a menudo procesos que afectan negativamente su calidad nutricional (Shah et al., 2016; Siyuan et al., 2018).

En términos de salud, lo más importante del maíz es cómo se prepara. En Mesoamérica, la nixtamalización ha sido una práctica central, ya que implica cocinar el maíz en una solución alcalina, generalmente con cal, y luego lavarlo para que sea más fácil digerirlo; no solo para hacer masa para tacos, tortillas, tamales y otros alimentos, sino también para modificar algunos nutrientes. Varios informes han demostrado que la nixtamalización puede aumentar el calcio en el producto final debido al uso de hidróxido de calcio en el paso de cocción y la mejora funcional y nutricional con respecto al grano (Kamau et al., 2020). Por lo tanto, el impacto del maíz en la salud no puede atribuirse completamente al grano en sí, sino a los métodos tradicionales que se emplean. El maíz también contiene fitoquímicos que han recibido atención por su posible papel en la prevención de enfermedades crónicas. Algunos de estos compuestos incluyen ácidos fenólicos, carotenoides, flavonoides y antocianinas que pueden funcionar en las vías antioxidantes del cuerpo humano. Siyuan et al. (2018) mencionan que el maíz contiene vitaminas, minerales y fibra dietética, así como compuestos fenólicos que incluyen ácido ferúlico, ácido cumárico, ácido siríngico, y pigmentos (en algunas variedades) que son carotenoides y antocianinas. Estos elementos son pertinentes ya que el estrés oxidativo se ha asociado con los fenómenos de daño celular, así como con la aparición de enfermedades crónicas no transmisibles. Pero el factor del maíz que afecta la salud no es simplemente un compuesto independiente, es su composición con su interacción con la dieta individual y los alimentos. En este sentido, los maíces pigmentados juegan un papel particular porque pueden contener componentes que no están presentes en las mismas proporciones en los maíces blancos o amarillos. Los pigmentos naturales en el maíz azul, morado y negro están en gran medida vinculados a las antocianinas con actividades antioxidantes y antiinflamatorias. Magaña-Cerino et al. (2020) indican que este tipo de maíces son de interés investigativo debido a su alto contenido de antocianinas y su posible acción sobre el estrés oxidativo; sin embargo, tales beneficios deben interpretarse con cuidado, ya que estos deben ser evaluados bajo las mismas condiciones experimentales y no en general. Aun así, estas variedades ofrecen opciones dietéticas importantes, no solo por su color o uso tradicional, sino también por el perfil químico que contienen. Por ejemplo, la tortilla está entre los productos derivados del maíz más consumidos en México y la calidad puede cambiar dependiendo del grano utilizado y el proceso de producción. Acosta-Estrada et al. (2023) identificaron diferencias en la calidad y composición de proteínas observadas en tortillas preparadas con distintas variedades de maíz, lo que respalda aún más la observación de que no todas las variedades de maíz contienen nutrientes idénticos. Esto es de gran importancia debido a que demuestra que el maíz está en el plan de ingesta diaria de la mayoría de las personas, y cambios menores en la composición pueden tener un peso considerable en la misma cantidad de consumo. Por lo tanto, discutir el maíz y la salud requiere un examen de lo que está hecho el grano, las prácticas de transformación que emplea, y la variedad y las circunstancias dietéticas de su consumo.

Maíz y salud mental

La relación entre la alimentación y la salud mental ha recibido cada vez más atención en los últimos años, particularmente porque la dieta impacta no solo el estado físico, sino también las actividades involucradas en la función cerebral. Se ha vuelto posible pensar en el maíz como parte de una dieta general, como un cereal que proporciona energía, fibra, minerales y compuestos bioactivos que pueden incorporarse a una dieta saludable y no solo como un alimento que actúa independientemente sobre la salud mental.

Firth et al. (2020) afirman que la calidad de la dieta puede estar asociada con la salud emocional, como lo demuestran los problemas inflamatorios, el estrés oxidativo, la microbiota intestinal y los problemas metabólicos. Por lo tanto, no se debe caer en el sensacionalismo al vincular el maíz a la salud mental, sino considerarlo dentro de un grupo de hábitos dietéticos que equilibran el cuerpo y que pueden beneficiar la salud del organismo. El cerebro necesita una fuente continua de energía para funcionar correctamente, por lo que, los carbohidratos en cereales son importantes para la dieta; sin embargo, la calidad de los alimentos y el tipo de procesamiento que se les da es de suma importancia, ya que los productos de maíz mínimamente procesados pueden formar parte de una alimentación variada; y su efecto dependerá de la preparación, la cantidad consumida y el patrón dietético completo. Comer maíz en métodos tradicionales, como tortillas nixtamalizadas, atoles o granos enteros, es un sustituto para los alimentos ultraprocesados ricos en azúcares añadidos, grasas o harinas refinadas. Sarris et al. (2015) señalan que la nutrición es uno de los aspectos importantes para promover la salud mental, ya que algunos patrones de dieta pueden alterar procesos fisiológicos que pueden afectar el estado de ánimo, la cognición y la respuesta al estrés. El maíz se incluiría en una dieta saludable si se prepara adecuadamente y es parte de una dieta variada, pero dependerá del

entorno alimentario completo y no estará influenciado estrictamente por el grano en sí. Además del suministro de energía, el maíz también alberga fitoquímicos que anteriormente se han investigado por su posible correlación con las vías antioxidantes en respuesta al estrés oxidativo.

Sheng et al. (2018) explican que el maíz contiene ácidos fenólicos, carotenoides, flavonoides, antocianinas y fibra dietética, mismos que cambian de concentración según su procesamiento y variedad del grano. Estos compuestos son importantes debido a su asociación con cambios en varios sistemas del cuerpo, entre ellos el sistema nervioso, donde el estrés oxidativo y la inflamación impactan directamente. Sin embargo, es una distinción importante que si el maíz contiene estos componentes, no implica que este mismo sirva como remedio para enfermedades psicológicas o neurológicas.

Por otro lado, Magaña-Cerino et al. (2020) explican que los maíces pigmentados (azul, morado y negro) han sido investigados como fuente de antocianinas, así como por su potencial antioxidante. Algunos estudios como el de Henriques et al. (2020), señalan que, dichas moléculas son capaces de modular procesos oxidativos y neuroinflamatorios; sin embargo, la extrapolación al consumo de maíz pigmentado, y a resultados clínicos en humanos, así como el dilucidar los mecanismos que están posiblemente implicados en la neuroprotección y la salud mental, aún requieren de más investigación.

Conclusión

El maíz es uno de los alimentos más importantes en la historia mundial, principalmente porque se originó en Mesoamérica y ahora es una parte integral de la dieta, la economía y la cultura de sociedades en todo el mundo. Su domesticación convirtió una planta silvestre en un alimento básico altamente adaptable y llevó al desarrollo de muchas variedades con diversos colores, texturas, composiciones y usos. Tal diversidad también es trascendental para la agricultura y la cultura, y es el resultado del trabajo continuo y el esfuerzo de comunidades que han elegido y conservado intencionalmente variedades de semillas que se ajustan a sus necesidades dietéticas, territoriales y culturales; entre ellas, los maíces pigmentados como el azul, el morado, o el negro, que poseen interés especial, debido a su contenido de compuestos bioactivos, como las antocianinas.

En definitiva, el maíz es un alimento natural que tiene importancia histórica, biológica, así como económica y cultural. Es crucial no solo por la producción mundial y por lo que produce, sino porque se expresa como agricultura tradicional, en mercados locales, comida mexicana y en los saberes comunitarios. Así, estudiar el maíz es entenderlo como un cultivo vivo, cuyo papel significativo se ha desarrollado a medida que plantas, humanos y entornos sociales lo producen y consumen. Al completar esta revisión, se deja clara la relevancia continua del maíz como recurso vital y de identidad, así como una oportunidad para futuras investigaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Guanajuato, que a través de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2023, proyecto 246/2023-UGto., se destinaron recursos para obtención de equipos de cómputo y habilitación de espacios que han permitido el desarrollo del presente trabajo, a la misma Universidad de Guanajuato que a través del XXXI Verano de la Ciencia otorgó apoyos sociales a las y los alumnos participantes; a las estudiantes y estudiante del programa de Psicología Clínica Amaya Saldívar Verdier, Hania Xarenny Ceballos López y Josué Jacob Torres Morales, por su apoyo en la revisión y organización del manuscrito; a la estudiante del programa de Doctorado en Ciencias, Lendy Yustin García Miranda (CINVESTAV) adscrita a nuestro laboratorio, por la asesoría y acompañamiento a los participantes. También agradecemos la participación del estudiante de la Licenciatura en Medicina Veterinaria y Zootecnia Víctor Alonso Feliciano Aguilar Zavala por su asesoría, y de manera especial a la Rectoría y autoridades del Campus Celaya-Salvatierra por las facilidades para el acceso a los espacios y su apoyo constante a nuestras tareas. Finalmente, agradecemos encarecidamente a todos los miembros del Laboratorio de Plasticidad Cerebral y Neurociencia integrativa, que de diferentes formas han apoyado y acompañado al equipo de trabajo.

Referencias

Acosta-Estrada, B. A., Serna-Saldívar, S. O., & Chuck-Hernández, C. (2023). Nutritional assessment of nixtamalized maize tortillas produced from dry masa flour, landrace s, and high yield hybrids and varieties. *Frontiers in Nutrition, 10*, 1183935. https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1183935

Bauer, E., Falque, M., Walter, H., Bauland, C., Camisan, C., Campo, L., Meyer, N., Ranc, N., Rincent, R., Schipprack, W., Altmann, T., Flament, P., Melchinger, A. E., Menz, M., Moreno-González, J., Ouzunova, M., Revilla, P., Charcosset, A., Martin, O. C., & Schön, C.-C. (2013). Intraspecific variation of recombination rate in maize. *Genome Biology, 14*, Article R103. https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-9-r103

Caldu-Primo, J. L., Mastretta-Yanes, A., Wegier, A., & Piñero, D. (2017). Finding a needle in a haystack: Distinguishing Mexican maize landraces using a small number of SNPs. *Frontiers in Gen etics, 8*, 45. https://doi.org/10.3389/fgene.2017.00045

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2005). *Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados* (texto vigente; última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de mayo de 2022). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf

Carrière Y, Brown ZS, Downes SJ, Gujar G, Epstein G, Omoto C, Storer NP, Mota-Sanchez D, Søgaard Jørgensen P, Carroll SP. (2020). Governing evolution: A socioecological comparison of resistance management for insecticidal transgenic Bt crops among four countries. Ambio. Jan;49(1):1-16. https://doi.org/10.1007/s13280-019-01167-0

Codex Alimentarius Commission. (2023). *Principles and guidelines on foods derived from biotechnology*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s. f.). Razas de maíz de México. Biodiversidad Mexicana. Recuperado el 24 de julio de 2026, de https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (s. f.). Maíces. Biodiversidad Mexicana. Recuperado el 24 de julio de 2026, de https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2024). Maíz: centro de origen y diversificación. https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices

Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., Cuevas, J., Montesinos-López, O., Jarquín, D., de los Campos, G., … Varshney, R. K. (2017). *Genomic Selection in Plant Breeding: Methods, Models, and Perspectives*. Trends in Plant Science, 22(11), 961–975. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011

Diario Oficial de la Federación. (2025, 17 de marzo). Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 4.º y 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de conservación y protección de los maíces nativos. https://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/66/2025/feb/DOF17MAR2025-Arts4y27CPEUM.pdf

Esquivel, A. G. E., & Massieu Trigo, Y. C. (2023). Valorización campesina de maíces pigmentados frente a la especialización de los mercados. Encrucijadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales, 23(1), Article a2306. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9089027

Fan, K., Ali, M., He, K., Feng, Y., Yu, T., Zhang, H., An, T., Zeng, W., Fu, J., Zhou, Y., Heng, Y., Gu, F., Wang, J., Huang, C., Li, L., & Li, H. (2024). Genomic analysis of modern maize inbred lines reveals diversity and selective breeding effects. *Science China Life Sciences*. https://doi.org/10.1007/s11427-024-2725-1

Feschotte, C. (2023). Transposable elements: McClintock's legacy revisited. *Nat Rev Genet* 24, 797–800 https://doi.org/10.1038/s41576-023-00652-3

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2024). *Panorama Agroalimentario: Maíz 2024*. FIRA. https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=122742

Firth, J., Gangwisch, J. E., Borsini, A., Wootton, R. E., & Mayer, E. A. (2020). Food and mood: How do diet and nutrition affect mental wellbeing? *BMJ, 369*, m2382. https://doi.org/10.1136/bmj.m2382

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *Agricultural production statistics 2010–2023*. FAO. https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/agricultural-production-statistics-2010-2023/en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). The state of the world's biodiversity for food and agriculture (J. Bélanger & D. Pilling, Eds.). https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca3129en

Gao, C. (2021). Genome engineering for crop improvement and future agriculture. *Cell*, 184(6), 1621–1635. https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.005

Henriques, J. F., Serra, D., Dinis, T. C. P., & Almeida, L. M. (2020). The anti-neuroinflammatory role of anthocyanins and their metabolites for the prevention and treatment of brai n disorders. *International Journal of Molecular Sciences, 21*(22), 8653. https://doi.org/10.3390/ijms21228653

International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications. (2026). Global status of commercialized biotech/GM crops: 2024 (ISAAA Brief No. 57). https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/57/

Kamau, E. H., Nkhata, S. G., & Ayua, E. O. (2020). Extrusion and nixtamalization conditions influence the magnitude of change in the nutrients a nd bioactive components of cereals and legumes. *Food Science & Nutrition, 8*(4), 1753–1765. https://doi.org/10.1002/fsn3.1473

Kistler, L., Maezumi, S. Y., Gregorio de Souza, J., Przelomska, N. A. S., Malaquias Costa, F., Smith, O., Loiselle, H., Ramos-Madrigal, J., Wales, N., Ribeiro, E. R., Morrison, R. R., Grimaldo, C., Prous, A. P., Arriaza, B., Gilbert, M. T. P., de Oliveira Freitas, F., & Allaby, R. G. (2018). Multiproxy evidence highlights a complex evolutionary legacy of maize in South America. *Science, 362*(6420), 1309–1313. https://doi.org/10.1126/science.aav0207

Liu, J., Fernie, A. M., & Yan, J. (2019). The Past, Present, and Future of Maize Improvement: Domestication, Genomics, and Functional Genomic Routes toward Crop Enhancement. *Plant Communications*, *1*(1), Article 100011. https://doi.org/10.1016/j.xplc.2019.100010

Liu, S., Qin, F. Análisis genético de la tolerancia a la sequía del maíz para la mejora de rasgos. *Mol Breeding* 41 , 8 (2021). https://doi.org/10.1007/s11032-020-01194-w

Magaña-Cerino, J. M., Peniche-Pavía, H. A., Tiessen, A., & Gurrola-Díaz, C. M. (2020). Pigmented maize (*Zea mays* L.) contains anthocyanins with potential therapeutic action agai nst oxidative stress: A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 70*(2), 85–99. https://doi.org/10.31883/pjfns/113272

OECD/FAO. (2025). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025–2034: Cereals*. OECD Publishing;Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.oecd.org/en/publications/2025/07/oecd-fao-agricultural-outlook-2025-2034_3eb15914/full-report/cereals_251d1ece.html

Organization for Economic Co-operation and Development. (2023). *Safety assessment of foods and feeds derived from genetically modified plants*. OECD Publishing.

Schnable, P. S., Ware, D., Fulton, R. S., Stein, J. C., Wei, F., Pasternak, S., Liang, C., Zhang, J., Fulton, L., Graves, T. A., Minx, P., Reily, A. D., Courtney, L., Kruchowski, S. S., Tomlinson, C., Strong, C., Delehaunty, K., Fronick, C., Courtney, B., … Wilson, R. K. (2009). The B73 maize genome: Complexity, diversity, and dynamics. *Science, 326*(5956), 1112–1115. https://doi.org/10.1126/science.1178534

Perales, H. R., & Golicher, D. (2014). Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLOS ONE, 9*(12), e114657. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657

Piperno, D. R., Ranere, A. J., Holst, I., Iriarte, J., & Dickau, R. (2009). Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106*(13), 5019–5024. https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106

Ranere, A. J., Piperno, D. R., Holst, I., Dickau, R., & Iriarte, J. (2009). The cultural and chronological context of early Holocene maize and squash domestication in the Central Balsas River Valley,

Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106*(13), 5014–5018. https://doi.org/10.1073/pnas.0812590106

Sarris, J., Logan, A. C., Akbaraly, T. N., Amminger, G. P., Balanzá-Martínez, V., Freeman, M. P., Hibbeln, J., Matsuoka, Y., Mischoulon, D., Mizoue, T., Nanri, A., Nishi, D., Parletta, N., Ramsey, D., Rucklidge, J. J., Sanchez-Villegas, A., Scholey, A., Su, K. P., & Jacka, F. N. (2015). Nutritional medicine as mainstream in psychiatry. *The Lancet Psychiatry, 2*(3), 271–274. https://doi.org/10.1016/S2215-0366(14)00051-0

Secretaría de Economía. (2025, 5 de febrero). Acuerdo por el que se deja sin efectos la aplicación de diversas disposiciones sobre maíz genéticamente modificado. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_to_pdf.php?edicion=VES&fecha=05/02/2025

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2000). *Cartagena Protocol on Biosafety: Text and annexes*. https://www.cbd.int/doc/legal/cartagena-protocol-en.pdf

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Shah, T. R., Prasad, K., & Kumar, P. (2016). Maize—A potential source of human nutrition and health: A review. *Cogent Food & Agriculture, 2*(1), 1166995. https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1166995

Sheng, S., Li, T., & Liu, R. H. (2018). Corn phytochemicals and their health benefits. *Food Science and Human Wellness, 7*(3), 185–195. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2018.09.003

Stitzer, M. C., & Ross-Ibarra, J. (2018). Maize domestication and gene interaction. *New Phytologist, 220*(2), 395–408. https://doi.org/10.1111/nph.15350

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2010). *Traditional Mexican cuisine: Ancestral, ongoing community culture, the Michoacán paradigm*. UNESCO Intangible Cultural Heritage. https://ich.unesco.org/en/RL/traditional-mexican-cuisine-ancestral-ongoing-community-culture-the-michoacan-paradigm-00400

United States Department of Agriculture, Economic Research Service. (2026). *Feed grains sector at a glance*. USDA ERS. https://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn-and-other-feed-grains/feed-grains-sector-at-a-glance

Varshney, R. K., Sinha, P., Singh, V. K., Kumar, A., Zhang, Q., & Bennetzen, J. L. (2020). *5Gs for crop genetic improvement*. Current Opinion in Plant Biology, 56, 190–196. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.004

Xiao, Y., Liu, H., Wu, L., Warburton, M., & Yan, J. (2019). Genome optimization for improvement of maize breeding. Theoretical and Applied Genetics, 133(5), 1491–1502. https://doi.org/10.1007/s00122-019-03494-5