



El maíz

(*Zea mays*):

un tesoro alimenticio

Coordinadora:
Verónica Hernández Robledo

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

El maíz (*Zea mays*): un tesoro alimenticio

El maíz (*Zea mays*): un tesoro alimenticio / Verónica Hernández Robledo, coordinadora .—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ; Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2025.

165 págs. ; 17 x 23 cm.

1. Maíz

LC: SB191.M2 M3.5 2025 DEWEY: 635.67 TVK

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2025

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905
cpublicaciones@uat.edu.mx • www.uat.edu.mx • https://libros.uat.edu.mx/

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-84-9

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-607-736-991-2

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.
Libro digital

Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Asimismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la editorial Fontamara.



El maíz (*Zea mays*): un tesoro alimenticio

Coordinadora:
Verónica Hernández Robledo





MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dra. Dora María Lladó Lárraga
SECRETARIA TÉCNICA

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

CP Jesús Francisco Castillo Cedillo
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodríguez** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

Introducción	9
Capítulo 1	11
El valor nutritivo del maíz y su industrialización	
<i>Rocío M. Uresti Marín, José Alberto Ramírez de León y Frida Carmina Caballero Rico</i>	
Capítulo 2	21
Procesos de fermentación a partir de subproductos de maíz	
<i>Luis V. Rodríguez-Durán, Nadia A. Rodríguez-Durán y María Alejandra Pichardo-Sánchez</i>	
Capítulo 3	45
Variabilidad genética y fenotípica del maíz	
<i>José Alberto López-Santillán, Benigno Estrada-Drouaillet y Zoila Reséndiz-Ramírez</i>	
Capítulo 4	55
Aplicación y conocimiento de la legislación alimentaria en el manejo integral del maíz (Zea mays)	
<i>Juan Francisco Castañón Rodríguez, Rocío Margarita Uresti Marín y Jovani Ruiz Toledo</i>	
Capítulo 5	73
Resistencia del maíz a estrés biótico y abiótico	
<i>Zoila Reséndiz Ramírez, Manuel Alvarado Carrillo e Hipólito Castillo Tovar</i>	
Capítulo 6	99
El maíz y sus derivados como fuente de antioxidantes	
<i>Verónica Hernández-Robledo, Ma. Guadalupe Bustos Vázquez, Anuar Valdilles-Segura y José Alfredo del Ángel del Ángel</i>	

Capítulo 7

111

El impacto de la biología molecular en maíz: implementación de nuevas técnicas

*Francisco A. Paredes-Sánchez, Omar Gutiérrez-Terrazas
y Elsa V. Herrera-Mayorga*

Capítulo 8

121

Desarrollo, uso y aplicación de nuevas tecnologías en el manejo integral del maíz

*Ángel Mario Lerma-Sánchez, Kevin Daniel Mendoza-Hernández
y Sergio Manuel Silva García*

Capítulo 9

137

Cinco plagas que atacan el cultivo de maíz (*Zea mays*) en México

*Saúl Pardo-Melgarejo, Ulises Santiago-López, Alejandra Mondragón-Flores,
Norma Zamora-Avilés y Norma Santiago-López*

Capítulo 10

155

Las aflatoxinas y su impacto en las etapas de producción del maíz (*Zea mays* L.) y sus derivados

*Alejandra Mondragón-Flores, Saúl Pardo-Melgarejo, Ulises Santiago-López
y Juan Antonio Herrera-González*

Introducción

El maíz, por su nombre científico *Zea mays*, es un cereal con antigüedad ancestral, ya que desde tiempos antiguos era utilizado como alimento. Se dice que es una planta noble y de fácil domesticación debido a sus características y condiciones de crecimiento. Este grano posee valor económico, social, cultural y religioso. Se destaca también por su valor nutricional, composición química de macronutrientes, como carbohidratos, grasas, proteínas, fibra, y algunos micronutrientes, como vitaminas (A, C y E); además de antioxidantes, hierro, cobre, potasio, zinc, magnesio, manganeso y fósforo, entre otros. Esta composición está presente en más de sesenta variedades existentes y todas son destinadas para alimento humano y animal.

A partir de este grano se elabora la tortilla, considerada el primer producto de la canasta básica en México; las tostadas, tamales, totopos, quesadillas, botanas, esquites, palomitas, bebidas, panes, sopas, platos fuertes, postres, etcétera. Además de tener aplicaciones industriales y biotecnológicas.

A nivel mundial, es uno de los cereales con mayor producción, países como Estados Unidos, China y Brasil son los principales productores. México ocupa la séptima posición, y el segundo lugar en exportación; le siguen países como Japón y Argentina. A nivel nacional, el maíz se cultiva en los treinta y dos estados del país, destacando Guanajuato, Michoacán, Sinaloa, Jalisco y Estado de México.

Debido a la importancia económica, nutritiva, social y cultural que aporta este cereal, en el presente libro se desarrollan temas como el valor nutritivo del maíz, el grado de industrialización y cómo ha ganado terreno en el sector alimentario debido a su composición nutricional. Por otra parte, los subproductos que se generan a partir del procesamiento del maíz contribuyen a la economía, reducen costos de producción y generan alto valor agregado.

La variabilidad genética y fenotípica del maíz hace referencia a los procesos evolutivos que ha sufrido, favoreciendo su diversificación. La aplicación de la legislación alimentaria favorece su producción; la calidad nutritiva y fisicoquímica es regulada por Normas Oficiales Mexicanas, lineamientos que establecen las características de estos derivados del cereal, además de favorecer el mercadeo de este producto en el país y en el extranjero.

Es importante comprender los factores que intervienen en el crecimiento y desarrollo de la planta. Por ello, se describe la resistencia del maíz a factores bióticos y abióticos. Actualmente, las tendencias alimentarias se dirigen a la obtención de alimentos que tengan un efecto benéfico en la salud de las personas. Nuevas investigaciones han reportado que el maíz es una fuente potencial de antioxidantes con un efecto funcional y terapéutico.

Otro tema que se aborda es el impacto de la biología molecular en el maíz, el cual describe que la implementación de nuevas técnicas moleculares ha servido de referencia para su uso, manejo y producción. Hoy en día, el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías en la utilización integral de maíz, ha generado un impacto positivo en el empleo de los sistemas de cultivo, rendimiento y sostenibilidad.

Las plagas que afectan a este cultivo tienen un efecto negativo que se busca contrarrestar, por lo que es preciso conocer cuáles son las plagas enemigas más comunes y que deben ser controladas, ya que generan grandes pérdidas económicas. Por lo anterior, se deben buscar nuevas estrategias de control. Por último, se estudia el impacto de las aflatoxinas en la producción y productos derivados del maíz, así como su control para evitar daños en la salud de las personas y en la economía de los productores; pautas que marcan el inicio para la toma de medidas de seguridad en el control de estas.

Capítulo 1

El valor nutritivo del maíz y su industrialización

Rocío M. Uresti Marín¹

José Alberto Ramírez de León¹

Frida Carmina Caballero Rico²

Introducción

El maíz se considera originario de América Central, particularmente de México, país en el que se ha datado su cultivo en fechas anteriores al año 5000 antes de la era cristiana, de acuerdo con vestigios encontrados en el valle de Tehuacán. Su cultivo era de gran importancia alimentaria, nutricional y religiosa para las diferentes culturas de la región, como la maya y la azteca.

El maíz (*Zea mays* ssp. *mays* L.) se origina a partir del teocintle (*Zea mays* ssp. *parviglumis* Itlis & Doebley) con dos vertientes teóricas: unicéntrica y multicéntrica. La primera postula que fue un evento único, el maíz se habría originado en la parte central de México, en una zona que abarca los estados de Guerrero, Michoacán y Estado de México, en donde se domesticó y se distribuyó al resto de las regiones. La segunda teoría considera que, el origen fue el mismo, pero fue espontáneo en diferentes regiones. Sin embargo, sigue sin establecerse la forma en que se dio la amplia variación racial del maíz que existe en la actualidad (Kato-Yamakake, 2023).

Los españoles esparcieron su cultivo al resto del mundo a través de la conquista de estas tierras, y actualmente se siembra en la mayoría de los países bajo diferentes condiciones climáticas y geográficas. Se considera que todos los meses se cosecha maíz en alguna parte del mundo, y su destino es diverso. En América Latina es un alimento humano, en tanto que en Estados Unidos y otros países desarrollados se usa; como forraje y en diversos productos farmacéuticos o industriales (FAO, 1993).

¹ Unidad Académica de Trabajo Social y Ciencias para el Desarrollo Humano. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario UAT. C.P. 87120. Cd. Victoria, Tamps.

Correo: ruresti@docentes.uat.edu.mx y ramirez@docentes.uat.edu.mx

² Facultad de Comercio y Administración Victoria. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario UAT. C.P. 87120. Cd Victoria, Tamps. Correo: fcaballer@uat.edu.mx

El cultivo de maíz ocupa el segundo lugar de la producción mundial, detrás de la caña de azúcar y antes del trigo. Se estima que se producen 1 148 000 de toneladas anuales y que su producción en 2029 será de 3 054 000. Al respecto, se espera que este incremento sea con base en el rendimiento por hectárea y no la superficie destinada a su cultivo, para no incrementar el impacto ambiental (Gabriel et al., 2022).

El maíz en México

En México, en 2019 el maíz blanco y el amarillo ocuparon el primer y tercer lugar de hectáreas sembradas, en tanto su producción ocupó el primer y segundo puesto en volumen generado (Tabla 1) (INEGI, 2023).

Tabla 1. Total de área sembrada y producción de maíz en 2019 por tipo de grano

Tipo de maíz	Hectáreas sembradas	Toneladas producidas
Grano blanco	6 672 098.2	25 811 328.1
Grano amarillo	1 411 676.3	5 400 839.4
Total	8 083 774.5	31 212 167.5

Fuente: INEGI (2023).

Se estima que la producción de maíz en México se obtiene a partir de pequeños y medianos productores (75 % del total) con rendimientos menores a 10 toneladas por hectárea y utilizando el 91 % del total de superficie de siembra (SADER, 2020).

El maíz blanco se utiliza principalmente para consumo humano (60 %) a través de su industrialización como harina y su molienda directa para producir nixtamal. El autoconsumo demanda 27 % de la producción anual y solo se destina un 9 % al sector pecuario. El resto se divide en 3 % como merma y 1 % se destina a semilla para posteriores ciclos (Bada-Carbajal et al., 2021).

La demanda de maíz amarillo creció anualmente de forma constante durante el periodo 2012-2021, pasando de 7 993 miles de toneladas a 19 877 000; y su uso principal es para el sector pecuario con un consumo del 76 % del volumen total, seguido por el uso industrial con un 17.44 % (Figura 1). Se estima que el 70.22 % de la demanda se atendió a través de importaciones del grano (Araujo, 2022).

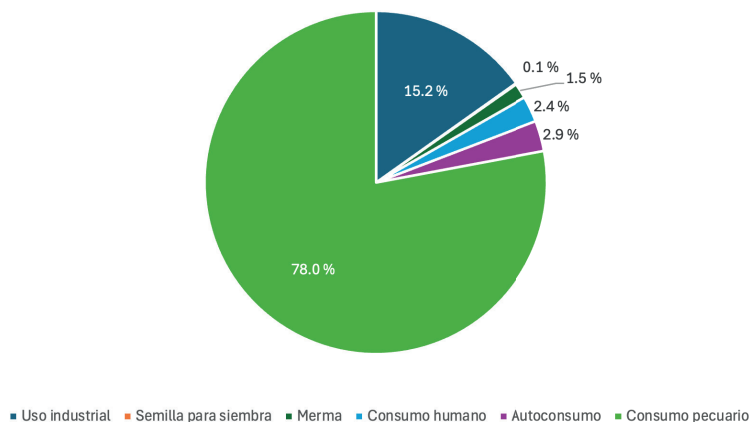


Figura 1. Distribución porcentual de la demanda de maíz amarillo en México (19 877 miles de toneladas) durante el ciclo productivo 2020-2021

Fuente: Araujo (2022).

Variedades de maíz

Existen diferentes formas de clasificar el maíz, con base en sus características fisiológicas (color, textura o composición del grano), agronómicas (nativos, híbridos o genéticamente modificados) y destino comercial (consumo animal, alimentación humana, transformación industrial) (Adiaha et al., 2016). En la Tabla 2 se clasifica el maíz de acuerdo con su estructura, variedad y usos principales. Los de mayor importancia comercial son los duros, dentados y harinosos.

Tabla 2. Tipos de maíces, variedad y uso al que se destina

Tipo	Variedad	Usos	Referencia
Duro	<i>Zea mays flint</i>	Se usa para molienda en seco, consumo humano y animal	Cirilo et al. (2011); Lucchin et al. (2003); Adiaha et al. (2016)
Dentado	<i>Zea mays indentata</i>	Se usa para molienda en seco, consumo humano y animal	Cirilo et al. (2011); Adiaha et al. (2016)
Harinoso	<i>Zea mays amiláceo</i>	Se usa para molienda en seco, consumo humano y animal	Cirilo et al. (2011); Adiaha et al. (2016)
Ceroso	<i>Zea mays cerea</i>	Industria del almidón para consumo humano o industrial	Adiaha et al. (2016)
Cristalino	<i>Zea mays indurata</i>	Industria del almidón para consumo humano; consumo animal	Sánchez (2014)

Tipo	Variedad	Usos	Referencia
Dulce	<i>Zea mays saccharata</i>	Principalmente para consumo enlatado, mazorca o en grano	Adiaha et al. (2016)
Palomero	<i>Zea mays everta</i>	Se usa para consumo humano por su característica de reventar; y para consumo animal	Adiaha et al. (2016)
Tunicado	<i>Zea mays tunicata</i>	Maíz criollo o nativo, que se usa para autoconsumo o consumo humano	Ramírez et al. (2017)

Fuente: Adiaha et al. (2016).

A partir de 1980, el maíz se ha destinado a la producción de bioetanol mediante su fermentación con levaduras, el subproducto se seca y se destina a alimentar ganado (Adiaha et al., 2016).

Estructura del grano maíz

Los granos de maíz se unen al olote a través del pedicelo (Figura 2), que contiene los conductos internos que permiten a la planta transportar nutrientes; representa 1 % del peso del grano. El pericarpio es la capa exterior, ocupa 5 %; es una cubierta fibrosa, dura e impermeable que protege al grano de infecciones microbianas. El germen da origen a la planta nueva, contiene el eje embrionario y una gran reserva de alimento para el mismo, es rico en lípidos, representa 12 % del grano. El endospermo harinoso y el duro son reservas energéticas compuestas principalmente por almidón (90 %) y algo de lípidos; representan el 82 % de la semilla (Pérez de la Cerda et al., 2007).

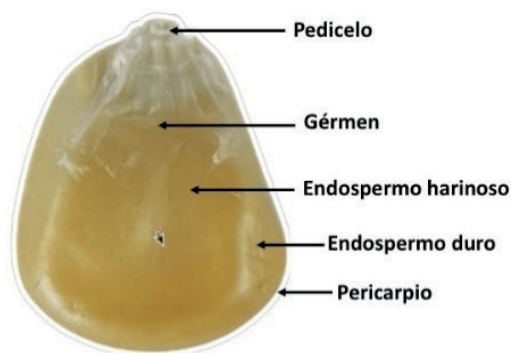


Figura 2. Principales componentes estructurales del grano de maíz

Fuente: Pérez de la Cerda et al. (2007).

Maíces pigmentados

El maíz presenta cinco coloraciones reconocidas: blanco, cremoso, amarillo, azul y rojo. Los tres primeros son los que más se siembran y comercializan. Los granos azules y rojos se denominan pigmentados y, dependiendo de la intensidad del color, asociada con la cantidad de pigmentos contenidos en la semilla, pueden presentar diferentes tonalidades, de forma tal que es posible encontrar reportes en la literatura que señalan variedades en: rojo, rosado, azul, morado y pinto (Esquivel et al., 2023); azul-morado, rojo cereza, rojo ladrillo (Salinas-Moreno et al., 2021); azul, rojo y pinto (Toxtle-Flores et al., 2023). Estos tipos de maíces se cultivan por campesinos e indígenas en cultivares de poca extensión de tierra, aunque su demanda se ha visto incrementada por el interés de mercados regionales que buscan atender a consumidores de las microempresas alimentarias semiartesanales, ya que pigmentan el alimento de manera natural. Atender estos mercados no siempre es del interés de los productores, en especial los de edad más avanzada, porque el mercado en ocasiones está controlado por intermediarios con poco aprecio a su cultura. En ellos, la producción tradicional y las prácticas agroecológicas son prioritarias sobre volumen productivo. Las generaciones jóvenes, menores de 40 años, especialmente mujeres, buscan atender estos mercados (Esquivel et al., 2023).

Valor nutricional

La composición del maíz puede variar entre los diferentes cultivares y variedades; pero en general, su composición puede apreciarse en la Figura 3. Es una de las más importantes fuentes de nutrientes para el ser humano y los animales de abasto, ya que se estima aporta hasta el 50 % de los requisitos proteicos; además de energía, minerales, lípidos y fibra cruda. Sin embargo, no debe ser la base única de alimentación por sus proteínas aminoácidos limitantes, principalmente lisina, triptófano y metionina, sino que deben ingerirse también leguminosas o proteína de origen animal (Chan-Chan et al., 2021).

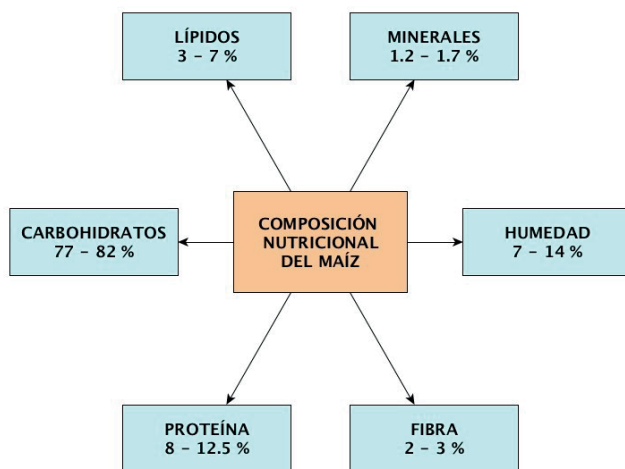


Figura 3. Composición nutricional del maíz

Fuente: Chan-Chan et al. (2021).

Industrialización

El procesamiento industrial del maíz se enfoca en la extracción del aceite (contiene 4 % de lípidos), el aislamiento y transformación de su almidón, que representa el 72 % del peso del grano. Este último componente se transforma en una amplia variedad de productos alimenticios e industriales, entre ellos, almidón en polvo, edulcorantes, bebidas, pegamento, alcohol industrial y etanol combustible. Se estima que el 40 % de la producción de maíz en Estados Unidos se destina a la producción de combustible (Ranum et al., 2014).

Las múltiples aplicaciones industriales del almidón se basan en sus propiedades como agente espesante, emulsionante, antiespumante, encapsulante y como pegamento. También son valorados por su capacidad para impartir características de textura, gelificar o formar películas. Su aprovechamiento industrial requiere modificar química o físicamente su estructura, procesos influidos por la composición del gránulo (contenido de amilosa y amilopectina).

Sin embargo, en la actualidad, a través de la selección genética del maíz, se procura la siembra de variedades con propiedades en sus almidones nativos que se adecúen a los protocolos de modificación química o física para que se utilicen más plenamente como almidones no modificados (Ostrander, 2015).

Al respecto, los maíces con alto contenido de amilosa (50 a 90 % del almidón total) proporcionan un almidón con funcionalidades únicas, influyendo en su gelatinización, retrogradación, solubilidad, poder de hinchamiento, estabilidad a la congelación-descongelación, transparencia, propiedades de pegado, reología, e incluso digestión *in vitro*. También se ha utilizado para aumentar los niveles de almidón resistente en los productos alimenticios (Obadi et al., 2023).

A partir del almidón se pueden obtener diferentes edulcorantes como las maltodextrinas, jarabes de glucosa, jarabes con alto contenido de fructosa, fructosa cristalina, dextrosa cristalina y jarabes de oligosacáridos. Estos productos comparten muchos pasos comunes en su manufactura. El proceso implica una hidrólisis total o parcial de las cadenas de amilosa y amilopectina mediante ácido o procesos ácido-enzimáticos. La hidrólisis ácida puede implicar la presencia de un alto porcentaje de fragmentos lineales, o ramificados, que pueden ser hidrolizados con alfa-amilasas, que escinden los enlaces alfa-1,4-D-glucosídicos de la amilosa y la amilopectina (Hobbs, 2009).

El almidón está presente en la mayoría de las formulaciones de los pegamentos comerciales, porque tiene propiedades adhesivas, es barato y está ampliamente disponible. Sus aplicaciones industriales abarcan la industria textil, papelera, de artefactos en madera, papel, cartón e incluso, en menor proporción, en la agricultura, como fijadores de pesticidas y fertilizantes foliares. Es frecuente el empleo de almidones modificados en la producción de adhesivos, porque tienen ventajas técnicas y de calidad sobre sus respectivos almidones nativos, principalmente los obtenidos por tratamiento térmico (pirodextrinas), seguidos de los almidones modificados químicamente (oxidados y modificados con ácido). El uso de almidones esterificados es menos común (Cereda, 2024).

La proteína principal del maíz es la zeína (comprende entre el 45 y 50% de su proteína total). Presenta baja solubilidad en agua y se considera poco nutritiva, por lo que no se aprovecha para consumo humano y debe ser parte de otras fuentes proteicas para consumo animal. Su utilización industrial se basa en aprovechar la capacidad de sus resinas para formar recubrimientos resistentes, brillantes e hidrófobos a prueba de grasa y su resistencia al ataque microbiano. Tiene potencial en la producción de fibra, adhesivos, recubrimientos, cerámica, tintas, cosméticos, textiles, goma de mascar y plásticos biodegradables (Shukla y Cheryan, 2001).

Referencias

- Adiaha, M. S., Agba, O. A., Attio, E. E., Ojikpong, T. O., Kekong, M. A., Obio, A. et al. (2016). Effect of maize (*Zea mays* L.) on human development and the future of man-maize survival: A review. *World Scientific News*, 59, 52-62. <https://hal.science/hal-04608984v1>
- Araujo, L. A. (2022). Demanda, oferta y precio de maíz amarillo en México 2012-2021. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 50(2), 197-208.
- Bada-Carbajal, L. M., Osorio-Antonia, J. y Ramírez-Hernández, Z. (2021). Evolución de la producción del maíz en Veracruz, México. *Investigación Administrativa*, 50(128), 12807. Doi: 10.35426/iav50n128.07
- Cereda, M. P. (2024). Starch glues and adhesives. En M. Cereda y O. Vilpoux. (Eds.), *Starch Industries: Processes and Innovative Products in Food and Non-Food Uses* (pp. 335-348). Academic Press.
- Chan-Chan, M., Moguel-Ordóñez, Y., Gallegos-Tintoré, S., Chel-Guerrero, L. y Betancur-Ancona, D. (2021). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alta calidad de proteína (QPM) desarrolladas en Yucatán, México. *Biotechnia*, 23(2), 11-21.
- Cirilo, A. G., Actis, M., Andrade, F. H. y Valentinuz, O. R. (2011). Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Research*, 122(2), 140-150.
- Esquivel, A. G., Vizcarra, I., Moctezuma, S. y Massieu, Y. (2023). Valorización campesina de maíces pigmentados frente a la demanda mercados especializados en Ocoyoacac, México. Encrucijadas. *Revista Crítica de Ciencias Sociales*, 23(1), a2305.
- FAO -Food and Agricultural Organization-. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Eldredge, JC and Thomas, WI.
- Gabriel, J. L., Martín-Lammerding, D., Allende-Montalbán, R., Mar Delgado, M. y Rodríguez Martín, J. A. (2022). Análisis de la producción de maíz en España. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1), 1-16. DOI: 10.18272/aci.v14i1.2468
- Hobbs, L. (2009). Sweeteners from starch: production, properties and uses. En J. BeMiller y R. Whistler. (Eds.), *Starch Chemistry and Technology* (pp. 797-832). Academic Press.
- INEGI -Instituto Nacional de Estadística e Informática-. (2023). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*. <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>
- Kato-Yamakake, T. Á. (2023). Caracterización y origen genético de tres razas de maíz a partir de datos de nudos cromosómicos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(3), 219-227.
- Lucchin, M., Barcaccia, G. y Parrini, P. (2003). Characterization of a flint maize (*Zea mays* L. convar. mays) Italian landrace: I. Morpho-phenological and agronomic traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 50, 315-327.
- Obadi, M., Qi, Y. y Xu, B. (2023). High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications. *Carbohydrate Polymers*, 299, 120185.

- Ostrander, B. M. (2015). Maize starch for industrial applications. En V. M. Cruz y D. Dierig (Eds.), *Industrial Crops: Breeding for BioEnergy and Bioproducts* (pp. 171-189). Springer.
- Pérez de la Cerda, F. J., Carballo Carballo, A., Santacruz Varela, A., Hernández Livera, A. y Molina Moreno, J. C. (2007). Calidad fisiológica en semillas de maíz con diferencias estructurales. *Agricultura Técnica en México*, 33(1), 53-61.
- Ramírez, A. M., Volke-Haller, V. y Guevara-Romero, M. L. (2017). El maíz ajo (*Zea mays tunicata*), especie endémica de Ixtenco, Tlaxcala. Identidad de importancia biológico-cultural. En I. Ibarra-López. (Ed.), *Estimación multidimensional de la población indígena en México* (pp. 67-78). Editorial El Colegio de Tlaxcala-CONACYT.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P. y Garcia-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105-112.
- SADER -Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural-. (2020). *Maíz el cultivo de México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico>.
- Salinas-Moreno, Y., Ramírez Díaz, J. L., Alemán de la Torre, I., Bautista-Ramírez, E. y Ledesma Miramontes, A. (2021). Evaluación de dos procedimientos de medición de color en granos de maíces pigmentados. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1297-1303.
- Sánchez, I. (2014). Maíz I (*Zea mays*). *Reduca (Biología)*, 7(2), 151-171. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/33739>
- Shukla, R. y Cheryan, M. (2001). Zein: the industrial protein from corn. *Industrial Crops and Products*, 13(3), 171-192.
- Toxtle-Flores, P., Gil-Muñoz, A., López, P. A. y Silva-Gómez, S. E. (2023). La diversidad de maíces nativos persiste en áreas rurales en transición hacia lo urbano. *Revista Bio Ciencias*, 10(2023), e1452.

Capítulo 2

Procesos de fermentación a partir de subproductos de maíz

Luis V. Rodríguez-Durán¹

Nadia A. Rodríguez-Durán¹

María Alejandra Pichardo-Sánchez^{1, 2}

Resumen

Uno de los principales cereales con mayor producción a nivel mundial es el maíz. Se utiliza para la alimentación humana, alimentación animal, producción de combustibles y otras aplicaciones industriales. Durante su procesamiento se generan subproductos como rastrojo, olote, licor de maceración del maíz (LMM), salvado y nejayote. Algunos de estos son utilizados directamente para alimentación animal o después de un proceso de fermentación conocido como ensilado. Por otra parte, los subproductos del maíz contienen nutrientes que pueden ser transformados por microorganismos en productos de alto valor agregado a través de fermentación sólida o sumergida, tales como enzimas, alcoholes, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, entre otros. Su uso contribuye a fomentar una economía circular y a reducir los costos de producción. En el presente capítulo se describen los principales subproductos generados durante el procesamiento del maíz, así como algunos ejemplos de procesos para transformarlos en productos con un alto valor agregado. **Palabras clave:** subproductos del maíz, fermentación, rastrojo de maíz, olote, licor de maceración del maíz.

¹ Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Boulevard E. Cárdenas González No. 1201. Poniente. Col. Jardín. C.P. 89840. Cd. Mante, Tamaulipas.
Correo: : luis.duran@docentes.uat.edu.mx

² Departamento de Biotecnología. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco. No. 186. Col. Leyes de Reforma. C.P. 09310. Iztapalapa, Ciudad de México.

Abstract

Maize is the cereal with the highest production worldwide. It is used for human food, animal feed, fuel production and other industrial applications. During maize processing, several byproducts are generated such as stover, cob, corn steep liquor, maize bran and nejayote. Some of these byproducts are used directly for animal feed or after a fermentation process known as silage. On the other hand, corn byproducts contain nutrients that can be transformed by microorganisms into a series of high added value products through solid or submerged fermentation processes, such as enzymes, alcohols, organic acids, phenolic compounds, among others. The use of these byproducts contributes to a circular economy and the reduction of production costs. This chapter describes the main by-products generated during corn processing, as well as some examples of processes to obtain high added value products from corn by-products.

Keywords: maize by-products, fermentation, corn stover, corn cob, corn steep liquor.

1. Introducción

El maíz es el cereal con la mayor producción a nivel global y uno de los cultivos agrícolas más importantes. Es de gran significación para la alimentación humana, especialmente en América Latina, África subsahariana, y algunos países de Asia, donde el maíz, consumido como alimento humano, aporta más del 20 % de las calorías diarias (Erenstein et al., 2022). En México, es el cereal más consumido y constituye la base de la gastronomía. Se utiliza en la elaboración de alimentos tradicionales, como: tortillas, pozole, tostadas, nachos, totopos, botanas, tamales, etcétera (Ramírez-Araujo et al., 2019). Además, se emplea para la producción industrial de harinas, sémola, almidones, edulcorantes, aceites de cocina, panes, tortillas, cereales para el desayuno, botanas, bioetanol y bebidas alcohólicas (Serna-Saldivar, 2023). Por otra parte, en las economías desarrolladas, se utiliza como cultivo forrajero, así como para diferentes aplicaciones industriales y energéticas (Erenstein et al., 2022).

En 2023, se cosecharon 1 200 millones de toneladas de maíz a nivel mundial, las cuales superaron los 800 millones de toneladas de arroz (FAO, 2024). El grano del maíz representa alrededor de la mitad del peso de las partes aéreas de la planta, la otra mitad se divide en tallos (50 %) hojas (23 %) olote (15 %) y cáscaras (14 %).

Durante su cosecha se producen más de 1 000 millones de toneladas anuales de subproductos (Phiri et al., 2024; Ratna et al., 2022). Una parte se utiliza entero como alimento animal o humano. Otra, se somete a procesos de separación para obtener productos como harinas, almidón y bioetanol. Dependiendo del proceso,

se obtienen diferentes subproductos líquidos o sólidos que representan del 5 al 30 % en peso del grano. A nivel mundial, el 54 % del maíz se usa para alimento animal, el 19 % para la industria de comida, el 13.8 % como alimento directo y el 14 % para la producción de bioetanol. Estos productos se fabrican a partir de materias primas obtenidas de tres industrias principales: molienda seca, molienda húmeda y nixtamalización (Saldivar y Perez-Carrillo, 2016).

El objetivo del presente capítulo es describir sus principales subproductos, así como explorar los procesos fermentativos para obtener productos con valor agregado.

2. Procesamiento del maíz

La cosecha del maíz se puede realizar de forma mecanizada o manual. Las máquinas cosechadoras pueden arrancar la mazorca entera, arrancar y deshojarla, o arrancar, deshojarla y desgranarla (Valero y Ortiz-Cañavate, 2003). El objetivo de la cosecha es obtener el grano del maíz. Durante el proceso, se genera un subproducto conocido como rastrojo, cuya composición depende del método utilizado.

En México, la mayor parte se somete a un proceso de nixtamalización para obtener masa, harina, tortillas, entre otros productos (Figura 1).

La nixtamalización es un proceso precolombino en el que los granos se cuecen en una solución de hidróxido de calcio para obtener masa de maíz fresca o harina de maíz nixtamalizada. Durante este proceso los granos sufren cambios físicos y químicos que mejoran la calidad nutricional de los productos alimenticios finales (Ramírez-Araujo et al., 2019). El proceso tradicional consiste en una cocción alcalina del grano entero usando 0.1-0.2 % Ca(OH)_2 , seguida de una maceración de 12 h. El agua de cocción, llamada nejayote, se desecha para eliminar los componentes solubles y el exceso de cal. Posteriormente, los sólidos se lavan 2 o 3 veces para eliminar el pericarpio y el álcali residual. Industrialmente, esta práctica genera una importante cantidad de residuos contaminantes con alta alcalinidad y demanda química de oxígeno (Ramírez-Jiménez y Castro-Muñoz, 2021). Durante el proceso de nixtamalización, se pierde alrededor del 5 % en peso del maíz, 3 % como sólidos suspendidos y 2 % como sólidos disueltos (López-Maldonado et al., 2017).

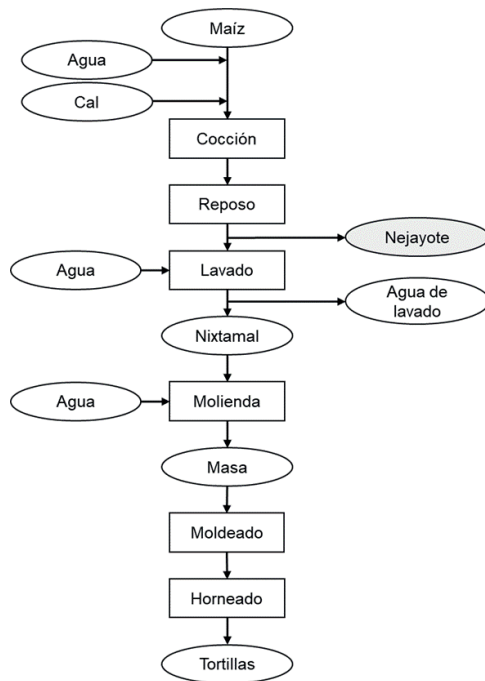


Figura 1. Diagrama del proceso de nixtamalización para la obtención de masa y tortillas
Fuente: modificado de Schaarschmidt y Fauhl-Hassek (2019).

En los países desarrollados, la mayor parte del maíz se usa para alimentación animal. Sin embargo, una parte considerable se utiliza para la obtención de productos industriales, como el almidón, edulcorantes, etanol, entre otros (Erenstein et al., 2022). Para ello, se somete a un proceso de molienda seca o húmeda y a etapas posteriores de separación, hidrólisis y fermentación (Zhang et al., 2021).

La producción de bioetanol de maíz mediante molienda seca es el método más sencillo, y está diseñado para fermentar la mayor parte del grano. Consiste en varios pasos principales que incluyen: molienda en seco, licuefacción, sacarificación, fermentación, destilación y recuperación de subproductos (Figura 2). El almidón se convierte en etanol y dióxido de carbono. El resto de los componentes del grano terminan en un subproducto, comúnmente conocido como granos secos de destilería con solubles (GSDS) (Liu, 2011). Los GSDS incluyen levadura, fibras, proteínas y otros componentes no fermentables que quedan después de la destilación, lo cual representa alrededor del 30 % en peso del maíz utilizado (Shad et al., 2021).

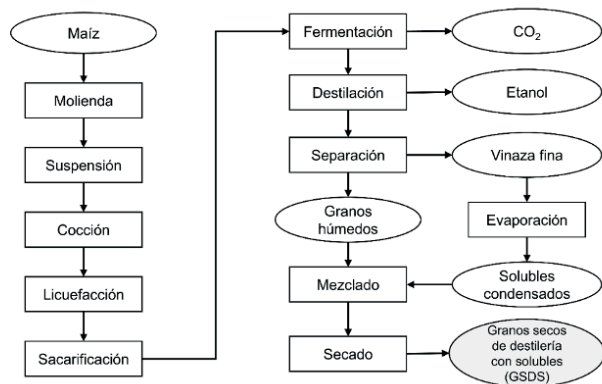


Figura 2. Diagrama del proceso de la producción de bioetanol a partir del maíz mediante molienda en seco

Fuente: modificado de Liu (2011).

Existen diferentes variantes de la molienda seca del maíz. Por ejemplo, la Figura 3 describe uno que incluye la desgerminación del maíz. Este proceso busca separar el germen y el pericarpio del endospermo. Como productos principales se obtienen la harina y la sémola de maíz. Como subproductos se obtienen el germen y el salvado de maíz. La desgerminación mejora la vida útil de los productos de endospermo al eliminar el aceite de germen del grano de maíz (Rausch y Eckhoff, 2016).

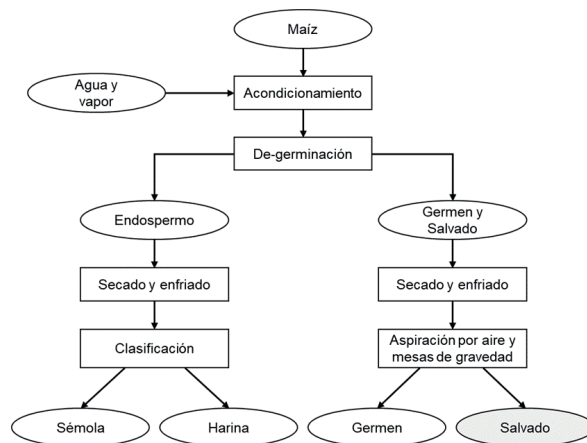


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso molienda seca-desgerminado del maíz

Fuente: modificado de Serna-Saldivar (2023).

El almidón y los productos refinados de la molienda en seco (harina y sémola) se utilizan principalmente para la producción de cereales para el desayuno, botanas, edulcorantes, cervezas tipo lager y etanol combustible o potable. El germen se emplea para la producción de aceite, mientras que el salvado se destina principalmente como alimento animal (Saldivar y Perez-Carrillo, 2016).

La molienda húmeda es el método más utilizado para la producción de almidón a partir de maíz. En este proceso se utilizan procedimientos químicos, biológicos y mecánicos para separar el almidón del gluten, el germen y la fibra (Figura 4). El proceso comienza con la maceración de los granos en presencia de SO_2 a 50 °C. El SO_2 facilita la separación del almidón de la matriz proteica mediante la ruptura de enlaces disulfuro en las proteínas del endospermo. Los granos ablandados e hinchados se muelen para separar el germen del endospermo y la cáscara. El germen se separa por flotación y la suspensión compuesta por cáscara, almidón y proteína se muele finamente. La suspensión se lava y se hace pasar por una serie de hidrociclones para obtener el almidón purificado (Kaushal et al., 2023).

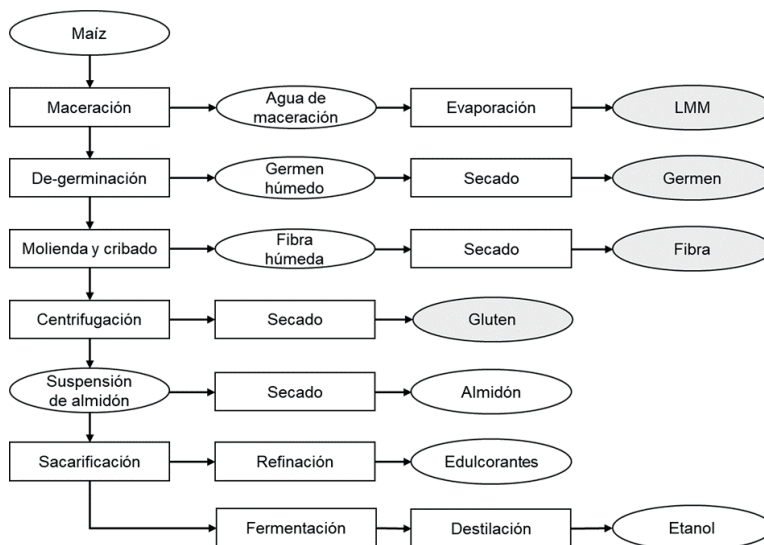


Figura 4. Diagrama del proceso de molienda húmeda del maíz

Fuente: modificado de Deepak y Jayadeep (2022).

El principal producto de la molienda húmeda del maíz es el almidón, el cual representa del 60 al 70 % en peso del grano. El almidón puede ser sometido a operaciones de hidrólisis, refinamiento, fermentación o destilación para obtener edulcorantes y etanol (Deepak y Jayadeep, 2022). Durante este proceso se obtienen alrededor de un 12 % de salvado de maíz, 7.5 % de germen, 6.5 % de licor de maceración de maíz (LMM) y 5.6 % de gluten (Zhang et al., 2021).

3. Aprovechamiento de los subproductos del maíz mediante fermentaciones

El aprovechamiento del maíz genera una cantidad considerable de subproductos. Durante su cosecha se produce el rastrojo y el olote (Phiri et al., 2024; Ratna et al., 2022). La industrialización del grano del maíz crea subproductos como el nejayote, el salvado, los granos secos de destilería con solubles (GSDS), el licor de maceración de maíz (LMM), el germen, la fibra y el gluten de maíz, dependiendo del proceso utilizado (López-Maldonado et al., 2017; Shad et al., 2021; Zhang et al., 2021). Estos se utilizan para alimentación animal o son quemados en el campo. Por otra parte, también pueden ser transformados con un alto valor añadido (Enawgaw et al., 2023). A continuación, se describen algunos procesos de fermentación utilizados para la valorización de los principales subproductos del maíz.

3.1. Rastrojo de maíz

Es considerado como una mezcla de tallos, hojas, mazorcas y cáscaras que quedan en el campo después de la cosecha (Figura 5). La composición química del rastrojo de maíz puede variar según su tipo. Sin embargo, generalmente se componen de un 70 % de celulosa y hemicelulosa, así como de un 15 a un 20 % de lignina (Aghaei et al., 2022). Llega a representar el 50 % de la biomasa aérea de la planta, por lo que el manejo de este subproducto llega a convertirse en un problema para el agricultor. El rastrojo se puede incorporar al suelo como abono o se puede recuperar para su uso en la alimentación animal. Sin embargo, algunos productores prefieren quemarlo en el campo para limpiar el terreno (Salinas-Vargas et al., 2022).



Figura 5. Rastrojo en campos de maíz

Fuente: elaboración propia.

El rastrojo de maíz es importante para la producción ganadera debido a su disponibilidad durante el periodo de escasez de forraje. Sin embargo, el alto contenido de humedad ocasiona una baja estabilidad y durabilidad (Sánchez et al., 2020). El ensilado es una técnica adecuada para la conservación del rastrojo y otros subproductos. Durante el ensilado, las bacterias lácticas fermentan azúcares, reducen la concentración de oxígeno, producen ácidos carboxílicos (ácido acético, butírico, propiónico y láctico), lo cual disminuye el pH. Estas condiciones reducen la actividad microbiana y preservan la biomasa (Nagle et al., 2020).

El rastrojo fresco, seco o ensilado puede ser utilizado para la obtención de una serie de productos como alcoholes, ácidos orgánicos, biogás, entre otros, a través de procesos fermentativos (Tabla 1).

Tabla 1. Productos obtenidos a partir de subproductos del maíz por fermentación

Sustrato	Producto (s)	Referencia
Rastrojo de maíz	Alimento animal (ensilado)	(Nagle et al., 2020; Sánchez et al., 2020)
Rastrojo de maíz	Etanol	(Elsagan et al., 2023; Yi et al., 2023; Zhang et al., 2020)
Rastrojo de maíz	Ácido láctico	(Klongklaew et al., 2023)
Rastrojo de maíz	Ácido palmitoleico	(Li et al., 2023a)
Rastrojo de maíz	Ácido succínico	(Li et al., 2023b)
Rastrojo de maíz	Acetona, butanol, etanol (ABE)	(Cai et al., 2024)
Rastrojo de maíz	Biogás	(Xu et al., 2023b; Zhang et al., 2023a)

Sustrato	Producto (s)	Referencia
Olote	Alimento animal	(Oduwuwa et al., 2008)
Olote	Xilanasas	(Elegbede & Lateef, 2018)
Olote	Pigmentos	(Velmurugan et al., 2011)
Olote	Ácido glucónico	(Dai et al., 2023)
Nejayote	Ácido láctico	(Cooper-Bribiesca et al., 2018)
Nejayote	Polihidroxialcanoatos	(Clifton-García et al., 2020)
Nejayote	Biohidrógeno	(Campos-Flores et al., 2023)
GSDS*	Ácido succínico	(Nghiem et al., 2016)
GSDS*	Etanol	(Li et al., 2019)
GSDS*	Xilanasas y celulasas	(Iram et al., 2022)
Salvado de maíz	β -glucosidasa	(Mule et al., 2024)
Salvado de maíz	Ingredientes funcionales	(Pontonio et al., 2019)
LMM**	Etanol	(Falowo et al., 2023)
LMM**	Biosurfactantes	(Lvova et al., 2023)
LMM**	Ramnolípidos	(Correia et al., 2022)

*GSDS = Granos secos de destilería con solubles, **LMM = Licor de maceración de maíz

Fuente: elaboración propia.

La obtención de productos de la fermentación a partir del rastrojo de maíz involucra el uso de operaciones físicas, químicas y biológicas, para extraer y separar azúcares que luego son fermentados por microorganismos. Por ejemplo, Elsagan et al. (2023) usaron un pretratamiento con ácido cítrico (3 %), ácido maleico (5 %) y autoclave (110 °C) para extraer celulosa y eliminar tanto la hemicelulosa como la lignina del rastrojo de maíz. La celulosa se hidrolizó enzimáticamente y se fermentó con *Saccharomyces cerevisiae* para obtener 10 g/L de etanol. Por otra parte, Zhang et al. (2020) usaron un proceso de licuefacción y fermentación simultánea para la producción de etanol a partir de rastrojo de maíz. En este proceso se exprime su jugo y el bagazo resultante se pretrata con ácido sulfúrico diluido (2 %, 120 °C, 2 h). El bagazo pretratado se lava, se mezcla con el jugo, se agrega una celulasa y se inocula con *S. cerevisiae*. La fermentación se lleva a cabo a 37 °C durante 120 horas. En estas condiciones se estima una producción de 3.53 toneladas de etanol por ha cuando se utiliza rastrojo fresco.

Los azúcares del rastrojo pueden ser convertidos en ácidos orgánicos mediante fermentación. Klongklaew et al. (2023) estudiaron la producción de ácido láctico a partir de rastrojo de maíz mediante el cocultivo de *Enterococcus mundtii* y *Lactobacillus rhamnosus*. El producto fue pretratado con ácido sulfúrico al 1 % (121 °C, 30 min), seguido de una hidrólisis catalizada por la enzima comercial Cellic CTec2 (50 °C, 48 h). El hidrolizado se suplementó con nutrientes, la fermentación se llevó a cabo en un biorreactor (2.5 L), donde se utilizó *E. mundtii* y *L. rhamnosus* a 37 °C. A las 48 h se alcanzó una concentración de 36.7 g/L de ácido láctico. Después de una purificación por electrodiálisis, se obtuvo ácido láctico con una pureza del 99.7 % p/p.

Li et al. (2023b) desarrollaron un proceso para la producción de ácido succínico a partir del rastrojo de maíz pretratado con álcali. Utilizando una cepa de *Corynebacterium glutamicum* modificada genéticamente alcanzaron una concentración de 117.8 g/L de ácido succínico en un proceso de lote alimentado. Li et al. (2023a) utilizaron una cepa de *S. cerevisiae* modificada genéticamente, para la producción de ácido palmitoleico a partir de un hidrolizado de rastrojo de maíz. Utilizando una estrategia de dos etapas alcanzaron una máxima producción de 6.56 g/L de ácido palmitoleico.

El rastrojo de maíz también puede ser convertido en acetona, butanol y etanol mediante un proceso conocido como ABE. Cai et al. (2024) utilizaron un pretratamiento con EDTA y un surfactante (PEG 8000) para separar la lignina y los carbohidratos. El rastrojo pretratado se hidrolizó con una celulasa comercial y se inoculó con *Clostridium acetobutylicum* ABE 1401 y se incubó en botellas serológicas a 37 °C. En las mejores condiciones, se obtuvo una concentración de solventes ABE de 15.4 g/L y un rendimiento de 137.2 g/Kg de rastrojo.

3.2. Raquis de maíz (olote)

El raquis del maíz (Figura 6) u olote, es el corazón de la mazorca del maíz; se genera en grandes cantidades en el proceso de separación del grano de la mazorca. Tiene distintos usos y aplicaciones, como forraje animal, combustible, material de embalaje y decoración. El olote representa entre el 40-50 % de la producción total del maíz. Es un residuo agroindustrial que contiene 41.4 % de hemicelulosa, 40 % es celulosa, 5.8 % de lignina, 2.5 % de proteína cruda, 2.1 % de almidón, 1.8 % ceniza, 1.1 % carbohidratos solubles y 0.7 % grasa cruda (Islam et al., 2023).



Figura 6. Raquis de maíz (olotes)

Fuente: elaboración propia.

El elevado contenido de hemicelulosa puede ser hidrolizada mediante enzimas, y los azúcares liberados puedan ser aprovechados como aditivos alimentarios, estos pueden convertirse en xilooligosacáridos o ácido láctico. Los xilooligosacáridos son polímeros funcionales formados por 2 a 7 moléculas de xilosa. Son aditivos alimentarios reguladores del crecimiento, que mejoran la flora y estructura intestinal, elevan la inmunidad en lechones destetados, cerdos y animales acuáticos (Uddin et al., 2021). El ácido láctico reduce el pH estomacal que deriva en la producción de enzimas digestivas, eleva la digestión de aminoácidos y promueve el crecimiento de bacterias benéficas en el tracto intestinal (Khan et al., 2020).

Mediante procesos fermentativos se pueden mejorar y potenciar el contenido de nutrientes en estos subproductos. Por ejemplo, Oduguwa et al. (2008) evaluaron el efecto de la actividad metabólica de *Rhizopus oligosporus*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger*, *Rhodotorula*, *Geotrichum candidum*, *Candida albicans*, y *Saccharomyces cerevisiae* sobre contenido de ceniza, proteína cruda, grasa y fibra. Los autores reportaron que al utilizar *S. cerevisiae* mejoró el contenido de proteína y grasas, mientras que *R. oligosporus* fue capaz de degradar significativamente la fibra. Los autores utilizaron el olote de maíz fermentado para formular piensos para conejos.

El olote de maíz también se ha utilizado para la producción de xilanasas. Elegbede y Lateef (2018) evaluaron ocho cepas de hongos capaces de sintetizar xilanasas empleando sistemas de cultivo líquido y sólido. En el cultivo líquido, la mayor actividad xilanasas se obtiene con *Aspergillus fumigatus* (50.55 U/mL). En cultivo en medio sólido, luego de 120 h de fermentación, alcanzaron entre 12.30 y 48.63 U/g con las diferentes cepas evaluadas, siendo *A. fumigatus* L1 con la que se obtuvo la mayor actividad enzimática.

Las xilanasas del olote de maíz se emplearon en la elaboración de pan y mejoraron tanto el crecimiento de la masa como la clarificación del jugo de naranja.

Otro de los posibles usos del olote de maíz es como sustrato para la obtención de pigmentos. *Monascus purpureus* KACC 42430 fue empleada en cultivo en medio sólido para la síntesis de un pigmento amarillo, alcanzando un rendimiento de 25.42 unidades de densidad óptica por gramo de materia seca fermentada (Velmurugan et al., 2011).

3.3. Nejayote

El nejayote (Figura 7) es el principal subproducto de la nixtamalización. Es una solución alcalina que resulta de la cocción de los granos de maíz en presencia de cal y tiene un alto contenido de azúcares, arabinoxilanos, fibra, compuestos fenólicos y calcio. La producción de este subproducto en México se estima en 14 millones de metros cúbicos al año y la mayor parte se vierte en cuerpos de agua sin un tratamiento previo, por lo que representa un serio problema ambiental (Castro-Muñoz et al., 2019).



Figura 7. Nejayote

Fuente: elaboración propia.

En años recientes se ha estudiado la posibilidad de utilizar el nejayote para la obtención de productos de valor añadido. Por ejemplo, Cooper-Bribiesca et al. (2018) evaluaron el crecimiento y la producción de ácido láctico por una cepa de *Streptococcus infantarius* aislada del pozol utilizando arabinoxilanos del nejayote como fuente de carbono. El arabinoxilano se aisló mediante precipitación con solventes y se utilizó para formular un medio de cultivo. La máxima producción de ácido láctico ($23.28 \pm 2.93 \mu\text{mol/mL}$) fue 2.3 veces mayor a la obtenida a partir de arabinoxilano de madera de haya. Clifton-García et al. (2020) utilizaron nejayote diluido para la producción de polihidroxialcanoatos por una cepa de *Achromobacter*

mucicolens aislada de suero forestal. Ellos obtuvieron una producción de 0.09 g/L de polihidroxialcanoatos, con un rendimiento producto biomasa (Y_{ps}) del 3.3 %. Rocha-Pizaña et al. (2020) utilizaron el nejayote para producción de proteasas por *A. oryzae*. El nejayote se mezcló con el agua de lavado y se liofilizó. Se formuló un medio de cultivo con 5 % de nejayote liofilizado. Con este medio se obtuvo una proteasa alcalina con actividad colagenasa.

El nejayote también se ha utilizado para la producción de H_2 y otros gases mediante un proceso conocido como fermentación oscura, la cual involucra el uso de *Clostridium* y otras bacterias estrictamente anaerobias. Por ejemplo, Campos-Flores et al. (2023) estudiaron la producción de biohidrógeno a partir de una mezcla de nejayote y aguas residuales de rastro. En las mejores condiciones, se obtuvieron 223 mL de H_2 por gramo de sólidos volátiles.

3.4. Granos secos de destilería con solubles (GSDS)

Los GSDS son un subproducto de la fermentación del bioetanol derivado de la molienda seca del maíz (Figura 8). Los GSDS son ricos en proteína cruda, grasa, fibra, vitaminas y minerales. Actualmente se utilizan como alimento para la acuicultura, el ganado y las aves de corral. Sin embargo, en los últimos años, los GSDS se han utilizado como materia prima en la producción de productos de valor agregado mediante fermentación microbiana (Iram et al., 2020).



Figura 8. Granos secos de destilería con solubles

Fuente: www.shutterstock.com

Nghiem et al. (2016) utilizaron GSDS como sustrato para la producción de ácido succínico por *Escherichia coli* AFP184. Los GSDS se trataron con amilasas para hidrolizar el almidón, seguido de un pretratamiento con una solución de amonio, una hidrólisis con celulasas y una hidrólisis ácido-diluida. El hidrolizado se neutralizó, se suplementó con nutrientes y se inoculó con células de *E. coli*. En las

condiciones estudiadas se obtuvo un rendimiento de 0.6 g de ácido succínico por g de azúcar consumido. Li et al. (2019) evaluaron el uso de GSDS en combinación con maíz para la producción de etanol. Los GSDS fueron pretratados con ácido diluido, se mezclaron en una relación 1:1 con maíz y se sometieron a un proceso de sacarificación y fermentación simultáneas usando glucoamilasas comerciales y un inóculo de *S. cerevisiae*. La adición de los GSDS resultó en un incremento del 15.1 % en la producción de etanol y un aumento del 86.5 % en la conversión de celulosa respecto al tratamiento con maíz solo.

Los GSDS también se han utilizado como sustrato para la producción de enzimas. Iram et al. (2022) optimizaron las condiciones de fermentación para la producción de celulasas y xilanasas por *Aspergillus niger* NRRL 330 en un biorreactor a nivel laboratorio. Los GSDS se pretrataron con ácido diluido, se suplementaron con peptona, extracto de levadura y sulfato de amonio. Después, se inocularon con esporas de *A. niger*. En las condiciones óptimas de producción se obtuvieron 0.82 U/mL de celulasa y 52.76 U/mL de xilanasas.

3.5. Salvado de maíz

El salvado (Figura 9) es la capa externa del grano de maíz que se elimina durante el proceso de molienda para producir harina de maíz. Contiene principalmente la cáscara del grano y es rica en fibra dietética, vitaminas B y minerales (Holguin-Acuña et al., 2011).



Figura 9. Salvado de maíz

Fuente: www.shutterstock.com

En ocasiones, los residuos como el salvado de maíz no se aprovechan porque en ellos se pueden acumular metales pesados y, en ocasiones, micotoxinas. Se ha demostrado que las bacterias ácido-lácticas tienen la capacidad de inhibir el crecimiento y la biosíntesis de micotoxinas (Decimo et al., 2017). Pontonio et al. (2019) reportaron que al fermentar salvado y germen de maíz con *Lactobacillus plantarum* T6B10 y *Weissella confusa* BAN8, las características nutricionales de estos subproductos mejoraron. El uso de bacterias acidolácticas incrementa la concentración de

aminoácidos y péptidos libres. Cuando el salvado y el germen prefermentados se emplean en la preparación de pan, las propiedades nutricionales, sensoriales y la textura del pan de trigo mejoraron, la digestibilidad de la proteínas aumentó en un 60 % y se redujo la hidrólisis del almidón.

El salvado de maíz es un sustrato útil para la obtención de enzimas. En el trabajo realizado por Mule et al. (2024) trabajaron en la producción de β -glucosidasas, mediante la fermentación en estado sólido y fermentación sumergida con *Aspergillus tubingensis* MTCC7956. Encontraron que usando fermentación discontinua se llegaba a una productividad de 400 ± 8.64 β -glucosidasas /l/día, mientras que usando lotes alimentados se mejoró la productividad enzimática a 647 ± 13.33 β -glucosidasas/l/día al reemplazar 50 % del medio y se llegaba a 987 ± 12.5 β -glucosidasas/l/día con 25 % de reemplazo medio, respectivamente.

3.6. Licor de maceración de maíz (LMM)

El LMM es el subproducto soluble concentrado que se obtiene del proceso de maceración del maíz durante la molienda húmeda. Sus sólidos son ricos en nitrógeno orgánico. Aproximadamente, la mitad del nitrógeno está presente como aminoácidos libres, el resto existe en forma de pequeños péptidos con muy poca proteína intacta. Además, contiene niveles relativamente altos de vitaminas, oligoelementos y ácido láctico (Loy y Lundy, 2019).

El LMM es un subproducto agrícola con importantes aplicaciones en la industria biotecnológica. Se utiliza como fuente de nitrógeno en la producción de antibióticos (Hofer et al., 2018), etanol (Taiwo Y Musonge, 2023), biosurfactantes (Almeida et al., 2021), solventes (Chen et al., 2023; Suttikul et al., 2023), ácidos orgánicos (Lian et al., 2023; Qin et al., 2024; Zhang et al., 2023b), enzimas (Suresh et al., 2024), biopesticidas (Saber et al., 2023), aromas (Xu et al., 2023a), entre otros productos.

Por otra parte, se ha evaluado el uso del LMM como principal fuente de nutrientes en algunos procesos de fermentación. Por ejemplo, Falowo et al. (2023) utilizaron el LMM como único sustrato para la producción de bioetanol por *S. cerevisiae*. En las condiciones óptimas obtuvieron una concentración de 9.49 g/L de etanol. Lvova et al. (2023) usaron el LMM como única fuente de carbono para la producción de biosurfactantes por *Aneurinibacillus aneurinilyticus*. En las mejores condiciones se produjeron 6 g/L de biosurfactantes extracelulares. Correia et al. (2022) evaluaron la producción de ramnolípidos por *Burkholderia thailandensis* a partir de LMM solo o adicionado con agua residual de la molienda del olivo. En el medio con LMM solo (7.5 % v/v) se produjeron 175 mg de ramnolípidos por L, mientras que en el medio adicionado con agua residual se obtuvieron hasta 269 mg/L.

4. Conclusiones

El maíz, es uno de los cultivos de mayor importancia a nivel mundial debido a su volumen de producción, la extensión de su área de cultivo y el valor comercial de sus productos. Durante su procesamiento se generan una gran cantidad de subproductos, los cuales representan más del 50 % en peso de la planta. Una parte de estos se utiliza para alimentación animal, pero otra parte se quema o se desecha sin ningún tratamiento previo. Los subproductos del maíz se pueden transformar en una serie de productos de alto valor añadido mediante procesos físicos y químicos. Su transformación biotecnológica podría reducir la generación de residuos orgánicos y ayudaría a aplicar la economía circular en la agroindustria.

Referencias

- Aghaei, S., Karimi Alavijeh, M., Shafiei, M. y Karimi, K. (2022). A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106447>
- Almeida, D. G., Soares da Silva, R. D., Meira, H. M., Brasileiro, P. P., Silva, E. J., Luna, J. M. et al. (2021). Production, characterization and commercial formulation of a biosurfactant from *Candida tropicalis* UCP0996 and its application in decontamination of petroleum pollutants. *Processes*, 9(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/pr9050885>
- Cai, D., Wen, J., Wu, Y., Su, C., Bi, H., Wang, Y. et al. (2024). Surfactant-assisted dilute ethylenediamine fractionation of corn stover for technical lignin valorization and biobutanol production. *Bioresource Technology*, 394, 130231. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130231>
- Campos-Flores, R. C., Reyna-Gómez, L. M., Suárez-Vázquez, S. I., Robledo-Olivo, A. y Cruz-López, A. (2023). Effect of inoculum pretreatment and operational mode of reactor on BioH₂ production from nixtamalization (nejayote) and abattoir wastewater. *Waste and Biomass Valorization*, 15(4), 2145-2158. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02279-1>
- Castro-Muñoz, R., Fíla, V. y Durán-Páramo, E. (2019). A review of the primary by-product (nejayote) of the nixtamalization during maize processing: Potential reuses. *Waste and Biomass Valorization*, 10(1), 13-22. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0029-4>
- Chen, C.-W., Yu, W.-S., Zheng, Z.-X., Cheng, Y.-S. y Li, S.-Y. (2023). Waste valorization through acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 160(15) 105280. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105280>
- Clifton-García, B., González-Reynoso, O., Robledo-Ortiz, J. R., Villafañá-Rojas, J. y González-García, Y. (2020). Forest soil bacteria able to produce homo and copolymers of polyhydroxyalkanoates from several pure and waste carbon sources. *Letters in Applied Microbiology*, 70(4), 300-309. <https://doi.org/10.1111/lam.13272>
- Cooper-Bribiesca, B., Navarro-Ocaña, A., Díaz-Ruiz, G., Aguilar-Osorio, G., Rodríguez-Sanoja, R. y Wachter, C. (2018). Lactic acid fermentation of arabinoxylan from nejayote by *Streptococcus infantarius* ssp. *infantarius* 25124 isolated from pozol. *Frontiers in Microbiology*, 9, 3061, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03061>
- Correia, J., Gudiña, E. J., Lazar, Z., Janek, T. y Teixeira, J. A. (2022). Cost-effective rhamnolipid production by *Burkholderia thailandensis* E264 using agro-industrial residues. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(22), 7477-7489. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12225-1>

- Dai, L., Lian, Z. A., Fu, Y. X., Zhou, X., Xu, Y., Zhou, X. L. et al. (2023). Low pH stress enhances gluconic acid accumulation with enzymatic hydrolysate as feedstock using *Gluconobacter oxydans*. *Fermentation-Basel*, 9(3), 1-12. <https://doi.org/10.3390/fermentation9030278>
- Decimo, M., Quattrini, M., Ricci, G., Fortina, M. G., Brasca, M., Silvetti, T. et al. (2017). Evaluation of microbial consortia and chemical changes in spontaneous maize bran fermentation. *AMB Express*, 7(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0506-y>
- Deepak, T. S. y Jayadeep, P. A. (2022). Prospects of maize (corn) wet milling by-products as a source of functional food ingredients and nutraceuticals. *Food Technology and Biotechnology*, 60(1), 109-120. <https://doi.org/10.17113/ftb.60.01.22.7340>
- Elegbede, J. A. y Lateef, A. (2018). Valorization of corn-cob by fungal isolates for production of xylanase in submerged and solid state fermentation media and potential biotechnological applications. *Waste and Biomass Valorization*, 9(8), 1273-1287. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9932-y>
- Elsagan, Z. A., Ali, R. M., Naggar, M. A. E., El-Ashtouky, E. S. Z. y AbdElhafez, S. E. (2023). New perspectives for maximizing sustainable bioethanol production from corn stover. *Renewable Energy*, 209, 608-618. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.138>
- Enawgaw, H., Tesfaye, T., Yilma, K. T. y Limeneh, D. Y. (2023). Multiple utilization ways of corn by-products for biomaterial production with bio-refinery concept; a Review. *Materials Circular Economy*, 5(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42824-023-00078-6>
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K. y Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295-1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Falowo, O. A., Taiwo, A. E., Afolabi, I., Fakinle, B. S. y Ojediran, J. O. (2023, del 5 al 7 de abril). Optimization of corn steep liquor as a sole substrate for bioethanol production using *Saccharomyces Cerevisiae*. *2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals (SEB-SDG)*, Omu-Aran, Nigeria. <https://doi.org/10.1109/SEB-SDG57117.2023.10124599>
- FAO -Food and Agricultural Organization-. (2024). *FAO Stat*. <http://www.fao.org>.
- Hofer, A., Hauer, S., Kroll, P., Fricke, J. y Herwig, C. (2018). In-depth characterization of the raw material corn steep liquor and its bioavailability in bioprocesses of *Penicillium chrysogenum*. *Process Biochemistry*, 70, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.04.008>

- Holguin-Acuña, A. L., Ramos-Chavira, N., Carvajal-Millan, E., Santana-Rodriguez, V., Rascón-Chu, A. y Niño-Medina, G. (2011). Non-starch polysaccharides in maize and oat: ferulated Arabinoxylans and β -glucans. En V. R. Preedy, R. R. Watson y V. B. Patel. (Eds.), *Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention* (pp. 153-159). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380886-8.10014-5>
- Iram, A., Cekmecelioglu, D. y Demirci, A. (2020). Distillers' dried grains with solubles (DDGS) and its potential as fermentation feedstock. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(14), 6115-6128. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10682-0>
- Iram, A., Cekmecelioglu, D. y Demirci, A. (2022). Optimization of the fermentation parameters to maximize the production of cellulases and xylanases using DDGS as the main feedstock in stirred tank bioreactors. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 45, 102514. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102514>
- Islam, F., Imran, A., Afzaal, M., Saeed, F., Asghar, A., Shahid, S. et al. (2023). Nutritional, functional, and ethno-medical properties of sweet corn cob: a concurrent review. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(5), 2181-2188. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16338>
- Kaushal, M., Sharma, R., Vaidya, D., Gupta, A., Saini, H. K., Anand, A. et al. (2023). Maize: an underexploited golden cereal crop. *Cereal Research Communications*, 51(1), 3-14. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00280-3>
- Khan, S., Moore, R. J., Stanley, D. y Chousalkar, K. K. (2020). The gut microbiota of laying hens and its manipulation with prebiotics and probiotics to enhance gut health and food safety. *Applied and Environmental Microbiology*, 86(13), 600-620. <https://doi.org/10.1128/AEM.00600-20>
- Klongklaew, A., Unban, K., Kalaimurugan, D., Kanpiengjai, A., Azaizeh, H., Schroedter, L. et al. (2023). Bioconversion of dilute acid pretreated corn stover to l-lactic acid using co-culture of furfural tolerant *Enterococcus mundtii* WX1 and *Lactobacillus rhamnosus* SCJ9. *Fermentation-Basel*, 9(2), 1-14. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020112>
- Li, S. Z., Su, C. S., Fang, M. D. N., Cai, D., Deng, L., Wang, F. et al. (2023a). Overproduction of palmitoleic acid from corn stover hydrolysate by engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*, 382, 129211. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129211>
- Li, K., Li, C., Zhao, X. Q., Liu, C. G. y Bai, F. W. (2023b). Engineering *Corynebacterium glutamicum* for efficient production of succinic acid from corn stover pretreated by concentrated-alkali under steam-assistant conditions. *Bioresource Technology*, 378, 128991. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128991>
- Li, X., Chen, S., Yu, Y., Wang, S., Xu, Z., Huang, H. et al. (2019). Ethanol production from mixtures of Distiller's Dried Grains with Solubles (DDGS) and corn. *Industrial Crops and Products*, 129, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.075>

- Lian, T., Zhang, W., Cao, Q., Wang, S., Yin, F., Zhou, T. et al. (2023). Efficient production of lactic acid from anaerobic co-fermentation of starch and nitrogen-rich agro-industrial waste using a batch system. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144689. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.144689>
- Liu, K. (2011). Chemical composition of distillers grains, a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(5), 1508-1526. <https://doi.org/10.1021/jf103512z>
- López-Maldonado, E. A., Oropeza Guzmán, M. T. y Suárez-Meraz, K. A. (2017). Integral use of nejayote: characterization, new strategies for physicochemical treatment and recovery of valuable by-products. En F. Robina y A. Zaki. (Eds.), *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery* (pp. 239-252). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/66223>
- Loy, D. D. y Lundy, E. L. (2019). Nutritional properties and feeding value of corn and its coproducts. En S. O. Serna-Saldivar. (Ed.), *Corn (Third Edition)* (pp. 633-659). AACCI International Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00023-1>
- Lvova, K., Martínez-Arcos, A., López-Prieto, A., Vecino, X., Moldes, A. B. y Cruz, J. M. (2023). Optimization of the operational conditions to produce extracellular and cell-bound biosurfactants by *Aneurinibacillus aneurinolyticus* using corn steep liquor as a unique source of nutrients. *Fermentation*, 9(4), 351. <https://doi.org/10.3390/fermentation9040351>
- Mule, T. A., Sawant, S. S. y Odaneth, A. A. (2024). Maize bran as a potential substrate for production of β -glucosidase. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(3), 4029-4039. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02747-z>
- Nagle, N. J., Donohoe, B. S., Wolfrum, E. J., Kuhn, E. M., Haas, T. J., Ray, A. E. et al. (2020). Chemical and structural changes in corn stover after ensiling: influence on bioconversion. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 739. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00739>
- Nghiem, N. P., Montanti, J. y Kim, T. H. (2016). Pretreatment of dried distiller grains with solubles by soaking in aqueous ammonia and subsequent enzymatic/dilute acid hydrolysis to produce fermentable sugars. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 179(2), 237-250. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-1990-2>
- Oduguwa, O. O., Edema, M. O. y Ayeni, A. O. (2008). Physico-chemical and microbiological analyses of fermented corn cob, rice bran and cowpea husk for use in composite rabbit feed. *Bioresource Technology*, 99(6), 1816-1820. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.036>
- Phiri, R., Mavinkere Rangappa, S. y Siengchin, S. (2024). Agro-waste for renewable and sustainable green production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139989>

- Pontonio, E., Dingeo, C., Gobetti, M. y Rizzello, C. G. (2019). Maize milling by-products: from food wastes to functional ingredients through lactic acid bacteria fermentation. *Frontiers in Microbiology*, 10(561), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00561>
- Qin, Y., Li, Y., Liang, G., Shen, N., Xian, L. y Wang, Q. (2024). Efficient production of succinic acid from sugarcane bagasse hydrolysate by *Actinobacillus succinogenes* GXAS137. *Fermentation*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/fermentation10010022>
- Ramírez-Araujo, H., Gaytán-Martínez, M. y Reyes-Vega, M. L. (2019). Alternative technologies to the traditional nixtamalization process: Review. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.007>
- Ramírez-Jiménez, A. K. y Castro-Muñoz, R. (2021). Emerging techniques assisting nixtamalization products and by-products processing: an overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(20), 3407-3420. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1798352>
- Ratna, A. S., Ghosh, A. y Mukhopadhyay, S. (2022). Advances and prospects of corn husk as a sustainable material in composites and other technical applications. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133563. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133563>
- Rausch, K. D. y Eckhoff, S. R. (2016). Maize: Dry Milling. En C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman y J. Faubion. (Eds.), *Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)* (pp. 458-466). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00238-2>
- Rocha-Pizaña, M. d. R., Chen, W. N., Lee, J. J. L., Buitimea-Cantúa, N. E., González-Nimi, E. y Gutierrez-Urbe, J. A. (2020). Production of a potential collagenolytic protease by nejayote fermentation with *Aspergillus oryzae*. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(10), 3289-3296. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14592>
- Saberi, F., Marzban, R., Ardjmand, M., Pajoum Shariati, F. y Tavakoli, O. (2023). Optimization of the culture medium, fermentation process, and effectiveness of a biopesticide from an iranian *Bacillus thuringiensis* var. tenebrionis (BN2). *Journal of Agricultural Science and Technology*, 25(2), 469-484. <https://doi.org/10.52547/jast.25.2.469>
- Saldivar, S. O. y Perez-Carrillo, E. (2016). Maize. En B. Caballero, P. M. Finglas y F. Toldrá. (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 601-609). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00436-0>
- Salinas-Vargas, D., Maldonado-Peralta, M. d. Á., Rojas-García, A. R., Graciano-Obeso, A., Ventura-Ríos, J. y Maldonado-Peralta, R. (2022). Evaluación de rastrojo y de grano en maíces nativos en Guasave Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(8), 1481-1488. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i8.3354>
- Sánchez, A., Perea, J., Montenegro, L., Espinoza, I., Avellaneda, J. y Barba, C. (2020). Cinética de degradación ruminal in situ de ensilado de rastrojo de maíz (*Zea mays*) con niveles crecientes de urea. *Archivos de Zootecnia*, 69(267), 320-326.

- Schaarschmidt, S. y Fahl-Hassek, C. (2019). Mycotoxins during the processes of nixtamalization and tortilla production. *Toxins*, 11(4), 227. <https://doi.org/10.3390/toxins11040227>
- Serna-Saldivar, S. O. (2023). Maize. En P. R. Shewry, H. Koxsel y J. R. N. Taylor. (Eds.), *ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology* (pp. 131-143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95295-8.00030-7>
- Shad, Z. M., Venkitasamy, C. y Wen, Z. (2021). Corn distillers dried grains with solubles: Production, properties, and potential uses. *Cereal Chemistry*, 98(5), 999-1019. <https://doi.org/10.1002/cche.10445>
- Suresh, G., Ragunathan, R. y Johny, J. (2024). Assessing the impact of corn steep liquor as an inducer on enhancing laccase production and laccase gene (Lac1) transcription in *Pleurotus pulmonarius* during solid-state fermentation. *Bioresource Technology Reports*, 27, 101905. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101905>
- Suttikul, S., Charalampopoulos, D. y Chatzifragkou, A. (2023). Biotechnological production of optically pure 2,3-butanediol by *Bacillus subtilis* based on dissolved oxygen control strategy. *Fermentation*, 9(1), 1-17. <https://doi.org/10.3390/fermentation9010015>
- Taiwo, A. E. y Musonge, P. (2023). Comparative evaluation of bioethanol fermentation process parameters using RSM, ANN and ANFIS. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(4), 961-975. <https://doi.org/10.1002/bbb.2490>
- Uddin, M. K., Hasan, S., Mahmud, M. R., Peltoniemi, O. y Oliviero, C. (2021). In-feed supplementation of resin acid-enriched composition modulates gut microbiota, improves growth performance, and reduces post-weaning diarrhea and gut inflammation in piglets. *Animals*, 11(9), 2511. <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/9/2511>
- Valero, C. y Ortiz-Cañavate, J. (2003). Cosechadoras de grano para maíz. *Agroequipos*, (3), 42-47.
- Velmurugan, P., Hur, H., Balachandar, V., Kamala-Kannan, S., Lee, K.-J., Lee, S.-M. et al. (2011). Monascus pigment production by solid-state fermentation with corn cob substrate. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 112(6), 590-594. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.08.009>
- Xu, H., Li, Z., Li, L., Xie, X., Cai, D., Wang, Z. et al. (2023a). Sustainable production of 2-phenylethanol from agro-industrial wastes by metabolically engineered *Bacillus licheniformis*. *LWT*, 173, 114414. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114414>
- Xu, Y. H., Song, Y. N., Jiang, H., Zhang, H. Q. y Sun, Y. (2023b). Effect of vacuum negative pressure aerobic hydrolysis pretreatment on corn stover anaerobic fermentation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16(2), 241-248. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231602.7975>

- Yi, X., Yang, D., Xu, X. Y., Wang, Y. J., Guo, Y., Zhang, M. et al. (2023). Cold plasma pretreatment reinforces the lignocellulose-derived aldehyde inhibitors tolerance and bioethanol fermentability for *Zymomonas mobilis*. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16(102), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02354-8>
- Zhang, C., Chen, H., Pang, S., Su, C., Lv, M., An, N. et al. (2020). Importance of redefinition of corn stover harvest time to enhancing non-food bio-ethanol production. *Renewable Energy*, 146, 1444-1450. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.066>
- Zhang, H., Wu, J. W., Zhao, X. L., Yan, P. X., Yang, R. M., Yan, J. et al. (2023a). Improving aerobic stability and methane production of maize stover silage with lactic acid bacteria inoculants: Focus on pentose-fermentation. *Industrial Crops and Products*, 201, 116861. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116861>
- Zhang, R., Ma, S., Li, L., Zhang, M., Tian, S., Wang, D. et al. (2021). Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review. *Grain & Oil Science and Technology*, 4(3), 89-107. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2021.08.003>
- Zhang, Y., Yun, J., Zhou, L., Zhang, G., Zhao, M., Zayed, H. M. et al. (2023b). Sustainable biosynthesis of 3-hydroxypropionic acid from crude glycerol: Metabolic engineering and process optimization. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135524. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135524>

Capítulo 3

Variabilidad genética y fenotípica del maíz

José Alberto López-Santillán¹

Benigno Estrada-Drouaillet¹

Zoila Reséndiz-Ramírez²

Resumen

El maíz es un modelo vegetal ideal para estudiar la variación natural debido a su genoma complejo y su alta diversidad. Por ello, esta gramínea es una buena referencia para analizar la genética mendeliana. Las variaciones fenotípicas, es decir, las diferencias observables entre individuos de la misma especie, resultan de la interacción entre la genética y el ambiente. El maíz nativo de México presenta una gran variación genética, la cual surge de mutaciones, recombinaciones y alteraciones cromosómicas, procesos causados por la selección natural, artificial y la deriva genética.

Proceso de diversificación del maíz

En México se encuentra la región de origen y domesticación del maíz (*Zea mays* L.), y todo el territorio mexicano es uno de los centros de diversificación más importantes de este cereal (Matsuoka et al., 2002). Los parientes silvestres del maíz y una infinidad de poblaciones nativas que se encuentran bajo procesos de selección natural o artificial, se han diferenciado genética y fenotípicamente durante los últimos 10 000 años. En estos ambientes ha ocurrido un proceso dinámico de multiplicación de especies. El lugar en el que interaccionan diferentes variantes culturales y biológicas se conoce como un área biocultural. Las poblaciones de maíz que se establecen en estas regiones sufren múltiples procesos evolutivos que favorecen la diversificación tanto dentro como fuera de las poblaciones. Esta se basa en el interés del productor que resguarda estas poblaciones.

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación-Facultad de Ingeniería y Ciencias-Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario Adolfo López Mateos, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87000. Correo: jalopez@docentes.uat.edu.mx

² Campo Experimental Río Bravo Tamaulipas-INIFAP. Carretera Matamoros-Reynosa. Km 61. Cd. Río Bravo, Tamaulipas.

Por ello, son procesos de origen antropocéntrico que están altamente relacionados con la diversidad de usos del maíz y con las condiciones agroecológicas en las que se desarrolla el cultivo.

En algunas regiones de México, Centro y Sudamérica existen poblaciones silvestres de teosinte (*Zea* spp.) o de *Tripsacum* spp. (Torres et al., 2015). Ahí, los procesos evolutivos son influenciados por la migración de alelos de estas especies a las poblaciones de maíz. En contraste, los procesos de diversificación que ocurren en lugares donde no existen parientes silvestres del maíz, la migración alélica solo se desarrolla entre las diferentes poblaciones de maíz que interaccionan en tiempo y lugar. Estos procesos evolutivos se realizan a una intensidad variable, de manera constante o intermitente, de manera puntual o continua; todo esto dependerá del nivel de intervención humana y de las condiciones ambientales imperantes. Lo anterior, ha provocado un alto nivel de diferenciación entre las poblaciones de maíz, lo que es proporcional a su nivel de domesticación.

La variabilidad morfológica y genética del maíz (Cervantes-Adame et al., 2016), a través de diferentes procesos evolutivos, involucran la selección artificial de manera consciente o inconsciente; así como el efecto ambiental y el flujo genético aleatorio o controlado. En México, esto ha permitido la generación de múltiples poblaciones, cada una con un rango de adaptación amplio o reducido solo a condiciones agroecológicas muy específicas (Preciado y Montes, 2011). Por ello, el germoplasma de maíz existente en este país representa el 22.7 % de la diversidad genética en el continente americano (Serratos-Hernández et al., 2004). En las regiones agrícolas con características de temporal y sistemas de producción de autoconsumo o tradicionales (Herrera-Cabrera et al., 2000) se concentra la mayor variabilidad de maíz, debido a que las condiciones ambientales restrictivas en estos sistemas de producción favorecen la diversificación del cultivo. Además, el ambiente en estas regiones induce a los agricultores para disponer de más de una variedad nativa adaptable (Aceves-Ruíz et al., 2002).

Muchas de estas regiones poseen una amplia diversidad de especies vegetales silvestres y domesticadas, en muchos casos comestibles y relacionadas con los productos generados a partir del grano de maíz. En consecuencia, las poblaciones humanas han generado y resguardado una alta cantidad de conocimiento relacionado con tal diversidad, tanto biológica como cultural.

Variabilidad fenotípica del maíz

La variabilidad fenotípica de este cereal se identifica por el amplio rango de diferencias en la morfología del grano y la mazorca, que incluyen color, textura y forma. Por ejemplo, existen granos redondos, alargados y puntiagudos; además, hay múltiples colores y, dentro de cada color, una extensa gama de tonalidades, incluidos los variegados. Las mazorcas pueden ser alargadas y finas, o redondas y anchas, con longitudes que varían entre 5 y 75 cm. Una clasificación bastante aceptada, que incluye todo el maíz existente, es la que se basa en ocho tipos: duro, dulce, reventador, dentado, harinoso, cristalino, opaco y *baby*.

Esta variabilidad se clasifica, estudia y representa en más de 220 razas en Latinoamérica. De ellas, 59 son originarias de México (Kato et al., 2009) y cinco son introducidas, resultando un total de 64 razas en el país. La clasificación del maíz en razas se basa principalmente en la morfología de la mazorca y, además, toma en cuenta algunas características morfológicas y fenológicas de la planta.

Debido a lo llamativo del aspecto del grano y de la mazorca, así como su rendimiento, es común que se analice la variabilidad de este cereal con base en la morfología de ambos componentes; sin embargo, la morfología y fenología de la planta es igual o más amplia. Basta considerar que existen algunos con 50 cm de altura, con 12 hojas, una panícula de escasos 15 cm de longitud y un ciclo biológico de menos de 80 días; mientras que algunas variedades pueden alcanzar una altura de más de 5 m, con 30 hojas, panícula de más de 40 cm de longitud y un ciclo biológico de 200 días.

Esto es una pequeña parte de la variabilidad existente en este cultivo. El nivel de diversidad fenotípica que existe en el maíz solo es comparable con la diversidad observada en *Canis lupus familiaris* o perro doméstico; sin embargo, es necesario considerar que en esta gramínea el proceso de domesticación se inició hace poco más de 9 000 años (Piperno et al., 2009; Van Heerwaarden et al., 2012), en tanto que las civilizaciones humanas que iniciaron la domesticación del perro existían hace 35 000 años (Skoglund et al., 2015). La diversidad fenotípica del maíz se evidencia con la existencia de cientos o miles de genotipos y cultivares locales (Goodman y Brown, 1988).

Esta variabilidad ha permitido que el rango de adaptación de la especie sea muy amplio, desde el ecuador hasta latitudes de 58 °N y 40 °S, dentro de un nivel de temperatura desde una base de 8 °C hasta un umbral de más de 40 °C. Esta condición incluye áreas ubicadas desde el nivel del mar hasta los 3 500 msnm. Ningún otro cultivo se ha distribuido tanto como este cereal. Su alto nivel de adaptabilidad le ha permitido desarrollarse en condiciones ambientales diversas.

Variabilidad genética del maíz

El genoma del maíz se compone de 2 000 000 de nucleótidos. El arroz presenta un tamaño equivalente al 25 % del maíz, mientras que este último representa 60 % de la magnitud del genoma humano. Su diversidad genotípica se genera a partir de 55 000 genes, duplicando el número de la especie humana. Esto muestra que no existe relación entre la magnitud del genoma y el número de genes de una especie.

Con esta cantidad de genes y de nucleótidos en el genoma del maíz, la determinación de la variabilidad genética total de la especie es difícil de determinar. La mayoría de los trabajos de investigación han utilizado una pequeña muestra del germoplasma existente. Con ello, se ha demostrado que, entre mayor es el número de poblaciones de una misma raza, el valor de la variación interpoblacional es más alto (Rocandio-Rodríguez et al., 2014). De igual manera, entre mayor sea el número de poblaciones, de marcadores moleculares y de individuos, habrá más alelos por locus y heterocigotos. Esto permitirá que se generen poblaciones con adaptación amplia y con baja endogamia. En cambio, las poblaciones con adaptación restringida y cultivadas en pequeñas extensiones de terreno pueden experimentar procesos de endogamia y deriva genética, lo que resultará en un bajo número de alelos por locus y, en consecuencia, pocos heterocigotos (Barrera-Guzmán et al., 2020).

La diversidad dentro de razas difiere notoriamente. Por ejemplo, en razas como Jala, Olotón y Zapalote Chico presentan altos índices de diversidad respecto a otras, resultado de la adaptación específica a una región geográfica restringida. Por lo mismo, se observa un nivel bajo de variación dentro de cada una. Por el contrario, razas provenientes de un rango mayor de adaptabilidad como los valles altos, transición y los trópicos presentan mayores índices de diversidad dentro de ellas (Ortega, 2003). Un ejemplo de esto es la Tuxpeño, que se ha manejado en programas formales de fitomejoramiento y muestra alta variabilidad dentro de sus poblaciones y, por lo tanto, cuenta con un amplio potencial genético (González-Castro, 2013).

La variabilidad genética del germoplasma mexicano de maíz, se ha caracterizado mediante metodologías que utilizan caracteres morfológicos, bioquímicos y moleculares (Herrera et al., 2000; Doebley et al., 1984; Sánchez et al., 2000; Reif et al., 2006). En general, esos estudios demuestran la gran variabilidad en este germoplasma, con valores superiores al 75 % dentro de razas y cercanos al 50 % dependiendo del origen de las accesiones. Toda esta variación ha favorecido que la difusión del maíz desde América hacia Europa, Asia y África sea muy compleja.

En estos continentes se ha conjuntado germoplasma de diferente origen, lo que favorece una mayor variabilidad genética entre poblaciones, contribuyendo así a la migración de una alta diversidad genética del maíz de manera global (Ruiz et al., 2013).

Relevancia de la variabilidad genética y fenotípica del maíz mexicano

El maíz es el cultivo con mayor importancia a nivel global, debido a su elevado valor potencial de uso soportado en la alta variación fenotípica que posee. Esta se debe a la amplia diversidad de ambientes a los que se adapta. Las poblaciones nativas de maíz son el germoplasma de este cultivo que posee mayor variabilidad fenotípica y genética, se utilizan en extensiones de terreno donde las condiciones agroecológicas y socioeconómicas no permiten el establecimiento de cultivares mejorados. Es decir, las poblaciones nativas muchas veces son superiores en su adaptación a condiciones ambientales específicas (Perales, 2008). Lo anterior, demuestra que la amplia variabilidad genética y fenotípica de este germoplasma constituye un recurso fitogenético de alta relevancia para la población mundial.

En México, existen 59 razas y más de 100 subrazas (Kato et al., 2009), aunque algunos investigadores consideran que son 64, que representan más del 25 % de las existentes en América Latina. La dispersión del maíz mexicano no ha tenido fronteras y, hoy en día, se ha comprobado la presencia de germoplasma de maíz mexicano en razas asiáticas de *Z. mays* (Mir et al., 2013), procesos que han sustentado la enorme importancia de este recurso.

Por otra parte, el desarrollo de nuevas técnicas y estrategias de estudio, como las metodologías basadas en la biotecnología, han permitido resaltar el valor y la importancia de recursos genéticos vegetales como el maíz. Conocer esta diversidad permite identificar alelos favorables para el mejoramiento genético, y debe apoyarse de una descripción fenotípica para identificar genotipos de interés. Los estudios de diversidad genética son de utilidad para conocer patrones de diversidad regional y poder formular estrategias integrales de conservación *in situ*, que permitan a los cultivos evolucionar en respuesta a los factores ambientales adversos (Perales y Golicher, 2014).

Pese a lo anterior, en el mejoramiento genético del maíz no se emplea toda la diversidad existente (Yong et al., 2017). Esto sugiere la necesidad de evaluar las razas que no se utilizan para desarrollar estrategias que permitan la formación de nuevas variedades para enfrentar factores adversos para la producción, como las altas temperaturas (Adebayo et al., 2015; Yousaf et al., 2018), plagas (Oloyede-Kamiyo et al., 2018) y enfermedades (Kulka et al., 2018). Esto puede ser la base para

lograr la soberanía alimentaria de México, en especial ante los cambios climáticos (Preciado y Montes, 2011). La evaluación de dicha diversidad es importante para los programas de mejoramiento genético, por su potencial como fuente de características nuevas, exóticas y favorables (Vigouroux et al., 2008).

Referencias

- Aceves-Ruíz, E., Turrent-Fernández, A., Cortes-Flores, J. I. y Volke-Haller, V. (2002). Comportamiento agronómico del híbrido H-137 y materiales criollos de maíz en el Valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(4), 339-347.
- Adebayo, M. A., Menkir, A., Gedil, M., Blay, E., Gracen, V., Danquah, E. et al. (2015). Diversity assessment of drought tolerant exotic and adapted maize (*Zea mays* L.) inbred lines with microsatellite markers. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 18, 147-154.
- Arteaga, M. C., Moreno-Letelier, A., Mastretta-Yanes, A., Vázquez-Lobo, A., Breña-Ochoa, A., Moreno-Estrada, A. et al. (2015). Genomic variation in recently collected maize landraces from Mexico. *Genomics Data*, 7, 38-45. doi: 10.1016/j.gdata.2015.11.002.
- Barrera-Guzmán, L. A., Legaria-Solano, J. P. y Ortega-Paczka, R. (2020). Diversidad genética en poblaciones de razas mexicanas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(1), 121-125. doi.org/10.35196/rfm.2020.1.121
- Caldu-Primo, J. L., Mastretta-Yanes, A., Wegier, A. y Piñero, D. (2017). Finding a Needle in a Haystack: Distinguishing Mexican Maize Landraces Using a Small Number of SNPs. *Frontiers in Genetics*, 8, 1-12.
- Cervantes-Adame, Y. F., Castillo-Gutiérrez, A., Carapia-Ruiz, V. E., Andrade-Rodríguez, M., Núñez-Valdez, M. E., Villegas-Torres, O. G. et al. (2016). Variabilidad genética y asociación morfológica entre poblaciones nativas de maíz y sus cruas F1. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), 1919-1931.
- Doebley, J. F., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. (1984). Isoenzymatic variation in *Zea* (Gramineae). *Systematic Botany*, 9(2), 203-218. doi.org/10.2307/2418824
- González-Castro, M. E., Palacios R. N., Espinoza B. A. y Bedoya S., C. A. (2013). Diversidad genética en maíces nativos mexicanos tropicales. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(Supl. 3-a), 329-338.
- Goodman, M. M. y Brown, W. L. (1988). Races of Corn. En G. F. Sprague y J. W. Dudley. (Eds.), *Corn and Corn Improvement* (pp. 33-79). American Society of Agronomy.
- Herrera, B. E., Castillo, F., Sánchez, J., Ortega, R. y Goodman, M. M. (2000). Caracteres morfológicos para valorar la diversidad entre poblaciones de maíz en una región: caso de la raza Chalqueño. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 23(2), 335-354. doi: 10.35196/rfm.2000.2.335
- Kato, T., Mapes, C., Mera, L., Serratos, J. y Bye, R. (2009). *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica*. UNAM-CONABIO.
- Kulka, V. P., Aparecida, S. T., Contreras-Soto, R. I., Maldonado, C., Mora, F. y Scapim, C. A. (2018). Diallel analysis and genetic differentiation of tropical and temperate maize inbred lines. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 18(1), 31-38. doi.org/10.1590/1984-70332018v18n1a5

- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sánchez, G. J., Buckler, E. y Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 99(9), 6080-6084. DOI: 10.1073/pnas.052125199
- Mir, C., Zerjal, T., Combes, V., Dumas, F., Madur, D., Bedoya, C. et al. (2013). Out of America: Tracing the genetic footprints of the global diffusion of maize. *Theoretical and Applied Genetics*, 126(11), 2671-2682. doi: 10.1007/s00122-013-2164-z.
- Oloyede-Kamiyo, Q. O., Ajala, S. O. y Job, A. O. (2018). Potential in a collection of adapted and exotic tropical maize inbred lines as resistance source for stem borers. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 10(8), 183-190. doi: 10.5897/JPBCS2018.0735
- Ortega P., R. (2003). La diversidad del maíz en México. En G. Esteva y C. Marielle. (Coords.), *Sin maíz no hay país* (pp. 123-154). Consejo Nacional para la Cultura y las Artes, Dirección General de Culturas Populares e Indígenas.
- Perales, H. R. (2008). Maíz, riqueza de México. *Ciencias*, (92-93), 46-55. <https://www.revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/14829>
- Perales, H. y Golicher, D. (2014). Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE*, 9(12), e114657. doi.org/10.1371/journal.pone.0114657
- Piperno, D. R., Ranere, A. J., Holst, I., Iriarte, J. y Dickau, R. (2009). Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B. P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 106(13), 5019-5024. doi.org/10.1073/pnas.0812525106
- Preciado, R. E. y Montes, S. (2011). *Amplitud, mejoramiento, usos y riesgos de la diversidad genética de maíz en México*. Sociedad Mexicana de Fitogenética.
- Reif, J. C., Warburton, M. L., Xia, X. C., Hoisington, D. A., Crossa, J., Taba, S. et al. (2006). Grouping of accessions of Mexican races of maize revisited with SSR markers. *Theoretical and Applied Genetics*, 113, 177-185.
- Rocandio-Rodríguez, M. A., Santacruz-Varela, A., Córdova-Téllez, L., López-Sánchez, H., Castillo-González, F., Lobato-Ortiz, R. et al. (2014). Caracterización morfológica y agronómica de siete razas de maíz de los Valles Altos de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(4), 351-361. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000400008&lng=es&tlng=es.
- Ruiz, C., Hernández, C., Sánchez, G., Ortega, C., Ramírez, O., Guerrero, H. et al. (2013). *Ecología y distribución actual y potencial de razas mexicanas de maíz*. INIFAP-CIRPAC.
- Sánchez, J. J., Goodman, M. M. y Stuber, C. W. (2000). Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Economic Botany*, 54, 43-59. doi.org/10.1007/BF02866599

- Serratos-Hernández, J. A., Islas-Gutiérrez, F., Buendía-Rodríguez, E. y Berthaud, J. (2004). Gene flow scenarios with transgenic maize in Mexico. *Environmental Biosafety Research*, 3(3), 149-157. doi: 10.1051/ebr:2004013.
- Skoglund, P., Ersmark, E., Palkopoulou, E. y Dalén, L. (2015). Ancient wolf genome reveals an early divergence of domestic dog ancestors and admixture into high-latitude breeds. *Current Biology*, 25(11), 1515-1519. doi: 10.1016/j.cub.2015.04.019.
- Torres, G., De la Cruz, L., Sánchez, J. J., Ruiz, J. A., Castañeda, J. J., Santacruz-Ruvalcaba, F. et al. (2015). Relaciones entre poblaciones de teocintle (*Zea* spp.) de México, Guatemala y Nicaragua. *Acta Botánica Mexicana*, (111), 17-45. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-71512015000200003&lng=es&tlng=es.
- Van Heerwaarden, J., Doebley, J., Briggs, W. H., Glaubitz, J. C., Goodman, M. M., Sánchez, J. J. et al. (2011). Genetic signals of origin, spread, and introgression in a large sample of maize landraces. *The Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 108(3), 1088-1092. doi.org/10.1073/pnas.1013011108
- Vigouroux, Y., Glaubitz, J. C., Matsuoka, Y., Goodman, M. M., Sánchez, J. y Doebley, J. (2008). Population structure and genetic diversity of new world maize races assessed by DNA microsatellites. *American Journal of Botany*, 95(10), 1240-1253. doi: 10.3732/ajb.0800097.
- Yong, H., Jin, Z. y Gao, L. (2017). Breeding potential of maize germplasm populations to improve yield and predominant heterotic pattern in Northeast China. *Euphytica*, 213(219), 1-13. doi.org/10.1007/s10681-017-2013-2
- Yousaf, M. I., Hussain, K., Hussain, S., Ghani, A., Arshad, M., Mumtaz, A. et al. (2018). Characterization of indigenous and exotic maize hybrids for grain yield and quality traits under heat stress. *International Journal of Agriculture & Biology*, 20(2), 333-337.

Capítulo 4

Aplicación y conocimiento de la legislación alimentaria en el manejo integral del maíz (*Zea mays*)

Juan Francisco Castañón Rodríguez¹

Rocío Margarita Uresti Marín¹

Jovani Ruiz Toledo²

Resumen

Se cree que el maíz se deriva de una planta silvestre llamada *teocintle* y que tiene sus orígenes en Mesoamérica. Fue domesticada por pueblos indígenas, transformándolo en la planta de maíz que conocemos hoy en día. *Zea mays* proviene del término *mahís*, utilizado por los taínos, un pueblo indígena del Caribe. El vocablo *mahís* se traduce literalmente como “lo que sustenta la vida”. Este nombre refleja su importancia como alimento básico y fuente de sustento para muchas culturas a lo largo de la historia. La sedentarización ocurrió hace unos 4 000 años en Mesoamérica, mientras que la domesticación y el cultivo permitieron a las comunidades establecer asentamientos permanentes, abandonar el nomadismo y adoptar un estilo de vida agrícola. Sin embargo, debido a la demanda de este alimento, es necesario aplicar normas, reglamentos, lineamientos y estatutos que garanticen su calidad, inocuidad y comercialización, tanto del criollo como del transgénico. En este último caso, su producción y comercialización debe regularse en todas las etapas del sistema alimentario, ya que tiene un impacto ambiental, agronómico, socioeconómico y cultural. En el presente capítulo se abordan ambos maíces como sistemas alimentarios de gran importancia en México y el mundo.

¹ Universidad Autónoma de Tamaulipas, Unidad Académica de Trabajo Social y Ciencias para el Desarrollo Humano, Centro Universitario S/N Cd. Victoria, Tamaulipas, C.P. 87149.
Correo: jfcastanon@docentes.uat.edu.mx

² Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM), Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, Benito Juárez, Ciudad de México, C.P. 03940

Además, se revisa la normatividad que regula su producción y comercialización, destacando las Normas Oficiales Mexicanas en materia de bioseguridad en el manejo integral del maíz. El estudio de dicha legislación sirve de apoyo para lograr un manejo más sustentable de este recurso alimenticio y garantizar la seguridad alimentaria y nutricional de la población.

Palabras clave: maíz, calidad, legislación, normatividad, seguridad alimentaria y nutricional

Introducción

Siendo uno de los principales cultivos a nivel mundial, su extensión ha sido universal, ya que la producción ha superado los mil millones de toneladas. México es el quinto productor global y, además, se cultiva en todos los estados que conforman este país, en los cuales existen 64 razas de maíces nativos, y se cuenta con una diversidad genética de 300 variedades (Secretaría de Bienestar, 2019). Se ha reportado que en promedio cada mexicano consume 146 kilos al año, siendo las tortillas el principal alimento consumido a base de este cereal. El maíz, siendo uno de los alimentos de mayor producción y consumo, está considerado por medio del Banco de Germoplasma del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) como un sistema agroalimentario que, además de proporcionar un valor nutricional y una seguridad alimentaria, requiere poner enfoque en su sostenibilidad por medio de la colaboración estrecha entre los diversos actores que participan en su producción, almacenamiento, distribución, procesamiento, comercialización y consumo, por medio de redes de centros de innovación y asociaciones público-privadas-civiles de esta cadena de valor.

De acuerdo con lo reportado por Yeverino et al. (2007), el consumo de este cereal en México impacta en la seguridad alimentaria debido a la diversidad de razas nativas de maíz, lo que posiciona al país como su centro de origen. Esto es posible, debido a las selecciones que realizan los agricultores que buscan características específicas como resistencia a plagas, condiciones climatológicas (frío, calor o sequía), altura de las plantas y otras enfermedades del cultivo. Esto ha permitido constituir un reservorio genético de alto valor que presenta razas nativas como unidades vinculadas con un desarrollo cultural y social, que favorece su conservación y mejora (Castillo, 1993). Esta riqueza de diversificación biológica ha hecho que el país cuente con el CIMMYT, que alberga más de 28 mil muestras únicas de maíz. Este es un patrimonio invaluable para la seguridad alimentaria de los mexicanos y la humanidad (CIMMYT, 2023).

Es importante que la legislación mexicana posea fundamentos científicos, con el fin de fortalecer a los pequeños y medianos productores para la siembra de variedades nativas que aporten a la producción nacional de este cereal. Asimismo, se requieren mejorar las condiciones del campo mexicano para que sea autosuficiente. Esto tiene como base la importancia del maíz en el aspecto económico, industrial, cultural, político y social (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). En los siguientes apartados se muestra un panorama general de la legislación aplicable a este sistema alimentario para garantizar su calidad, inocuidad y comercialización.

El maíz criollo y el maíz transgénico como sistemas alimentarios

En México, el maíz representa cerca del 60 % de la producción total. Los millones de hectáreas utilizadas para su cultivo se traducen en poco más de 18 000 000 de toneladas. Oseguera y Ortega (2016) mencionan que el ciclo de vida del maíz se relaciona con las actividades culturales y agrícolas de la población. Este grano se puede preparar en más de 600 platillos y bebidas, ceremonias religiosas, festivales seculares y celebraciones familiares.

Por otra parte, en su cultivo, todas las partes tienen un propósito y uso específico. De la mazorca, el grano se consume directamente o puede ser utilizado en la próxima siembra. El olote funciona como combustible o fuente de fibra en dietas para animales, así como para la fabricación de desgranadores y tapones para recipientes. Los olotes calcinados también se usan para dar brillo e higiene a los dientes. La composición del pelo de elote se caracteriza por tener compuestos fenólicos conocidos como taninos, a estos compuestos bioactivos se les atribuye la mejora de algunos padecimientos relacionados con la digestión, problemas del sistema renal y urinario.

El *totomoxtle* (hoja del elote) es utilizado para elaboración de cigarrillos, artesanías, como envoltura de tamal, alimento como forraje para animales, entre otros múltiples usos. La caña del maíz produce un líquido dulce que se consume directamente de la planta o se utiliza para elaborar bebidas alcohólicas como el zotol. Incluso el rastrojo, que incluye los tallos, hojas y raíces del maíz, se utilizan como abono para la tierra y puede generar el hongo conocido como huitlacoche (alimento funcional para los mexicanos). Además, sirve como combustible en fogones, al obtener etanol del tallo y del almidón presente en los granos de maíz (Carrillo, 2009; Gual-Díaz et al., 2020; Jácome, 2003).

Es importante asegurar el acceso y la disponibilidad alimentaria del maíz; por su valor nutritivo y reducido costo, es la base de la alimentación en México y es consumido por toda la población, independientemente de su estrato social. Por ello, se debe promover la equidad y la seguridad alimentaria para todos. La libre elección por lo alimentos, la forma de consumo y su producción se relaciona con la introducción del grano de maíz modificado genéticamente en México, y que ha desencadenado opiniones divididas. Esto representa un desafío en la construcción de sistemas agroalimentarios que sean sustentables (Domínguez, 2015). El transgénico, al imponerse como una opción dominante en la producción de alimentos, puede restringir las opciones disponibles para los consumidores y limitar la diversidad de alimentos tradicionales y culturalmente significativos.

El maíz transgénico es ampliamente cultivado en Estados Unidos y representa una parte significativa de las exportaciones a México. Este tipo de maíz cultivado en Estados Unidos se diferencia de los maíces mexicanos tradicionales en varios aspectos. En primer lugar, su desarrollo se lleva a cabo en laboratorios mediante la modificación genética, lo que implica la inserción de genes de otras especies para conferirle características específicas, como resistencia a plagas o tolerancia a herbicidas. Además, en Estados Unidos, se destina principalmente a usos industriales, como la producción de etanol y forraje, así como a la fabricación de productos ultraprocesados. Esto contrasta con los maíces mexicanos, que tradicionalmente han sido cultivados y consumidos como alimento básico por parte de la población (Álvarez y Piñeyro, 2008; Nadal y Wise, 2004).

Es importante tener en cuenta estas diferencias, ya que el maíz transgénico puede tener implicaciones tanto en la cadena alimentaria como en la soberanía alimentaria de México (Luna y Reyes, 2015). Esto ha generado preocupación en algunos sectores de la sociedad mexicana, que defienden la preservación de los maíces nativos, la diversidad agrícola y la cultura gastronómica asociada al maíz en el país.

México es autosuficiente en maíz blanco, que es el utilizado para la producción de tortillas, y parte fundamental de la canasta básica. Las tortillas de maíz nativo ofrecen beneficios nutricionales adicionales en comparación con las elaboradas con transgénico; además, aportan un valor cultural al país (Batra, 2009). Algunas de las ventajas de los maíces nativos, según Batra (2009) y Salinas et al. (2012), incluyen:

1. Mayor contenido de proteínas y fibras: generalmente es alto en comparación con los maíces transgénicos. Esto puede contribuir a una mayor saciedad y a una dieta más equilibrada.
2. Ácidos grasos de cadena intermedia: el ácido linolénico conjugado tiene un efecto de mejora en la reducción de enfermedades cardiovasculares.

3. Antioxidantes: los maíces nativos, especialmente las variedades de color azul, rojo y morado, se caracterizan por presentar antioxidantes como las antocianinas. Los cuales han demostrado tener un efecto de protección contra enfermedades cardiovasculares, crónicas no transmisibles y cáncer.

El uso del maíz transgénico es limitado en México, no se utiliza para producir alimentos como la tortilla y otros derivados básicos. La mayoría de los maíces transgénicos importados se destinan a usos específicos, como los mencionados anteriormente (Álvarez y Piñeyro, 2008; Nadal y Wise, 2004). Por tales motivos, para abordar estas problemáticas se requiere una mayor conciencia y educación de la sociedad sobre los impactos del maíz transgénico en la alimentación y la importancia de la soberanía alimentaria. Asimismo, se necesitan políticas públicas que promuevan la transparencia en la producción y etiquetado de alimentos, así como el fomento de prácticas agrícolas sostenibles y diversificadas que respeten las tradiciones culturales y preserven la biodiversidad.

Dentro de los aspectos económicos en la producción y comercialización del maíz transgénico pueden estar los involucrados en las empresas transnacionales que tienen el dominio de las semillas, así como la venta de los agroquímicos necesarios, la inversión en investigación y desarrollo cuyos recursos son limitados para las instituciones públicas de investigación agrícola; las pequeñas empresas no tienen programas de mejoramiento genético. Además, los productores pueden correr el riesgo de ser demandados si sus cultivos adquieren un gen y desarrollan una variedad patentada por alguna empresa transnacional (Luna y Reyes, 2015). Por tanto, algunas consecuencias de la liberación comercial de maíz transgénico pueden ser: ecológicas, agronómicas, socioeconómicas y culturales, que es necesario valorar para poder establecer políticas adecuadas.

Normatividad y aspectos legales relacionados con la calidad e inocuidad del maíz

Con lo anterior, regular la inocuidad y calidad de los productos repercute en el: valor nutricional, seguridad alimentaria, producción y venta de los alimentos. En el caso del maíz, existen dos normas que la regulan (ambas pertenecen al *Codex Alimentarius*): la primera es la CXS 153-1985, la cual tiene por objetivo que las empresas procesadoras implementen los lineamientos para que el grano dirigido al consumo humano, envasado y a granel, cumplan con los estándares de calidad. En segundo lugar, la norma CODEX STAN 154-1985 está dirigida a las empresas que procesan el grano a harina integral de maíz. Los estándares de calidad que deben cumplir establecen que los granos deben ser no germinados, maduros y sanos;

mientras que el proceso de molienda debe asegurar que la harina obtenida debe ser completamente pulverizada y óptima para consumo humano. Otros lineamientos que establecen ambas normas son: métodos de análisis, métodos de muestreo, composición de los productos finales, contaminantes a los que son susceptibles, tipo de envasado, descripción del producto y su relación con el etiquetado.

En México existe un órgano llamado Cámara Nacional de Maíz Industrializado (CANAMI), el cual se fundó en 1976, y tiene por objetivo representar los intereses de productores, empresas y asociaciones que se dediquen a participar en la cadena de procesamiento y transformación del maíz. Entre los productos que se obtienen están la harina de maíz nixtamalizado, derivados de almidón, productos intermedios e industriales, así como otros derivados: como botanas, frituras, cereales, tortillas, etcétera. A su vez, los integrantes de la Cámara mencionan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que aplican durante el procesamiento del grano; entre los órganos reguladores de estas normas se encuentran: Secretaría de Salud, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), entre otros. En la Tabla 1, se detallan las Normas Oficiales Mexicanas que son parte de la regulación sanitaria del maíz en México.

Tabla 1. Normatividad regulatoria vigente aplicada al maíz en México

Clave	Publicación en el Diario Oficial de la Federación	Entidad que emite	Descripción
NOM-076-SSA1-2002	09/02/2004	Secretaría de Salud	Documento que establece los requisitos para el procesamiento del alcohol etílico (etanol) y el cual fue modificado derivado de la NOM-076-SSA1-1993.
NOM-187-SSA1/SCFI 2002	18/03/2003	Secretaría de Salud	Tiene por objetivo establecer lineamientos, especificaciones sanitarias y métodos de prueba que van dirigidos a establecimientos que elaboran y procesan productos como harinas preparadas, tortillas, tostadas y masas.

Clave	Publicación en el Diario Oficial de la Federación	Entidad que emite	Descripción
NOM-018-FITO-1995	10/12/1996	SAGARPA	Establece medidas de regulación que controla el acceso de productos como semillas, granos, plantas, derivados del maíz (importados), entre otros. Esto con el fin de evitar la introducción de plagas a través de los productos ya mencionados.
NOM-028-FITO-1995	12/10/1998	SAGARPA	Establece requisitos aplicados a granos y semillas para reexportación e importación, los cuales no son destinados a siembra. También aplica para empaques, materiales de embalaje y transporte para dichos productos, el fin es evitar la contaminación por plagas de tipo cuarentenario.
NOM-147-SSA1-1996	10/12/1999	Secretaría de Salud	Establece especificaciones nutrimentales y sanitarias aplicables a productos como cereales, harinas, panes, entre otros.

Fuente: elaboración propia.

Las medidas preventivas para mantener y regular el proceso primario del grano de maíz incluyen la NOM-003-SEMARNAT-1997, NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996, establecidas por la SEMARNAT, con el objetivo de vigilar los límites máximos de contaminantes presentes en descargas de aguas residuales a sistemas de alcantarillado. Esta regulación sanitaria vigila la inocuidad del maíz producido en campos de cultivo mexicano.

En cuanto a sus productos derivados, se aplican las normas establecidas por la Secretaría de Economía (NOM-050-SCFI-2004 y NOM-051-SCFI-1994), relativas al etiquetado general en alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasadas. Estas NOM regulan la calidad e inocuidad de los productos para aumentar la confianza de los consumidores en el mercado.

Por otro lado, su comercialización implica un control de calidad que garantice su seguridad, tanto nutricional como económica, debido a que un factor muy importante, y que afecta de manera directa al grano, es la humedad.

La NOM-226-SCFI-2018 es aplicable a los productores en el territorio nacional; determina el contenido de humedad, los métodos de prueba y un error máximo permitido de 0.8 % si $(0.05 \times \text{contenido de humedad en base húmeda}) < 0.8\%$. Otra forma de determinar el contenido de humedad en grano de maíz molido y entero es a través de medidores digitales. Los métodos de referencia se establecen en la NMX-119-SCFI-2015. El grano de maíz blanco, destinado a la elaboración de tortillas de maíz y otros derivados comercializados en el país, se aplica la NMX-FF-034/1-SCFI-2002. En la Tabla 2 se muestran los parámetros de calidad, tales como olor, humedad, densidad, presencia de contaminantes, así como su importancia comercial, precio y usos de destino que establece esta norma.

Tabla 2. Parámetros de calidad del maíz establecidos en la normatividad mexicana

Criterio	Características	Especificaciones
Tipos de maíz	Maíz blanco	El contenido de grano blanco debe ser del 98 % como mínimo, puede presentar maíz claro como amarillo, rosa, grisáceo, o maíz oscuro como azul, negro o morado, ambos no deben rebasar más del 2 %.
	Maíz duro (córneo)	Se caracteriza por ser de superficie lisa, el endospermo representa cerca del 50 % (base seca del grano). Su aspecto es opaco, almidonoso, la porción representa el 35 % en base seca del grano.
	Maíz suave (harinoso)	Su aspecto es opaco, almidonoso, la porción representa el 35 % en base seca del grano.
	Maíz semidentado (semiduro)	Su aspecto es de duro a harinoso.
Clasificación	Grado 1 Grado 2 Grado 3	
Olor	Olor característico al grano de maíz sano, seco y limpio.	Libre de cualquier factor que represente o muestre un efecto de mala conservación, por ejemplo, la rancidez, presencia de mohos, humedad.
Humedad	14 %	Límite máximo permitido, lo cual tiene un efecto sobre su almacenamiento, conservación y manejo.
Densidad	74 kg/hl	Parámetro que deben respetar los productores de derivados (tortillas, productos nixtamalizados) de maíz.

Criterio	Características	Especificaciones
Aplicación de agroquímicos	El uso de estas sustancias representa un riesgo a la salud del consumidor, por lo que se debe revisar el uso y aplicación de sustancias químicas como insecticidas, plaguicidas y fungicidas, así como verificar la inexistencia de roedores y semillas tóxicas.	Usar solamente productos permitidos por la (CICOPLAFEST).
Microorganismos y parásitos	Otro riesgo biológico es la presencia de éstos y que a su vez pueden representar un riesgo en la salud.	Mantener los niveles o los límites máximos permisibles establecidos en las normas correspondientes de la Secretaría de Salud.
Aflatoxinas	Por su toxicidad y peligro al consumo de este tipo de contaminantes, se debe cuidar la presencia y contenido de <i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. parasiticus</i> y <i>A. nomius</i> .	Mantener los niveles o los límites máximos permisibles establecidos en las normas correspondientes de la Secretaría de Salud.

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 3 muestra especificaciones en cuanto a la calidad del maíz nixtamalizado. Los métodos de prueba para cada uno de los parámetros están detallados en los incisos 7.2, 7.5 y 7.6. Estos parámetros suelen clasificarse como grado 1, 2 y 3 dependiendo de sus características.

Tabla 3. Parámetros de calidad del maíz nixtamalizado

Parámetros generales			
	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Impurezas (%) máximo	2.0	2.5	3.0
Daños por calor (%) máximo	1.5	2.5	3.5
Suma de daños (%) máximo	5.0	7.0	10.0
Granos quebrados (%) máximo	3.0	3.5	4.0
Parámetros de nixtamalización			
	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Humedad en nixtamal (%)	36-42	36-42	36-42
El índice de flotación se determina por la dureza del grano (% máximo)	40	40	40
La determinación de pericarpio remanente se emplea el método de remoción en solución alcalina. Valor de escala 1-5	Mayor a 2	Mayor a 2	Mayor a 2
Se utiliza el método de determinación por sólidos en agua de nexayote para determinar la pérdida de materia seca	5	5	5

Fuente: elaboración propia.

Ese proceso de nixtamalización fue desarrollado por culturas mesoamericanas, y se emplea en la industria para producir tortillas. Este proceso mejora el valor nutricional y la calidad del grano de maíz, ya que el almidón presente en variedades de maíz blanco y pigmentadas influye en la estructura cristalina de los almidones, así como su gelatinización y la concentración de antocianinas (Agama et al., 2004).

Este proceso, independientemente del grado de calidad del maíz utilizado, permite aprovechar los beneficios de este alimento.

Actualmente, el PROY-NOM-187-SSA1/SE-2021 hace referencia a los productos preparados (tostadas y tortillas) con masa de maíz. Además, establece los lineamientos y especificaciones sanitarias respecto a su procesamiento. Este proyecto de norma cancela a la NOM-187-SSA1/SCFI-2002, la cual declara que todos los productos derivados del maíz, dependiendo del color del grano y que sean sometidos a diferentes tratamientos térmicos, tendrán una denominación diferente (Tabla 4).

Tabla 4. Características de los productos alimenticios elaborados a base de masa de maíz

Insumo	Color del grano de maíz	Proceso	Producto derivado	Cocción
Maíz harina de maíz	Azul	Nixtamalizado	Masa	
	Amarillo	Precocido	Producto derivado de masa	
	Blanco	Cocido	Tortilla	
	Rojo	(según aplique)	Tostadas	Frito
	Rosa		Botanas	Deshidratado
	Naranja		Cereales para el desayuno	Horneado
	Negro			Extruído
	Verde			Otro
	Multicolor			

Fuente: elaboración propia.

El proyecto anterior, está relacionado con los límites en especificaciones fisicoquímicas, químicas, contenido de materia extraña, contenido microbiológico y concentraciones de aflatoxinas. Las NOM son de aplicación obligatoria en el territorio mexicano para garantizar la obtención de productos inocuos y de calidad sanitaria. Cuando se trate de maíz utilizado como cereal y productos como semillas, harinas, sémolas, etcétera, aplica la NOM-247-SSA1-2008, que establece lineamientos que aseguran tanto un valor nutricional como calidad en los productos.

Estas normativas inciden en el derecho a una alimentación sana y nutritiva, que es la base de la salud de la población mexicana. En este sentido, en el Diario Oficial de la Federación se publicó el 13 de abril del 2020, la *Ley Federal para el Fomento y Protección del Maíz Nativo*, que obliga a que se declaren las actividades relacionadas con la producción, comercio y consumo de este tipo de maíz; mismas que tendrán un impacto en la alimentación variada, equilibrada y suficiente de los consumidores. Otro punto importante, es el establecimiento institucional de organismos que protejan y fomenten el uso de maíz nativo, ya que esto permite la existencia de una diversidad genética respecto al color del grano, tipo de mazorca, tamaño y textura; además de mejorar las condiciones climáticas de adaptación, entre otros factores.

Además, el maíz nativo es parte de la identidad y de la cultura mexicana, y para proteger su diversidad, la Comisión Nacional del Maíz Nativo (CONAM) planea, diseña y supervisa bancos de semillas, realiza investigación y programa políticas públicas. Estas actividades, relacionadas con el uso y fomento para la protección del maíz nativo, permiten implementar nuevas estrategias que mejoren la sustentabilidad de sistemas tradicionales de producción en el país y en aquellas zonas geográficas con mayor producción de este grano. A su vez, conserva sistemas ecológicos de agricultura en pro de la diversidad genética, incluyendo el comercio (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2020; Ley Federal para el Fomento y Protección del Maíz Nativo, 2020).

Bioseguridad en el manejo integral del maíz transgénico

A pesar de los objetivos establecidos por la CONAM, y debido a que el uso del maíz transgénico es controversial, desde 1995 se ha buscado cuidar su inocuidad, ya en 1998 las empresas productoras solicitaron que se realizaran pruebas experimentales en este producto, haciendo énfasis en aquellas que se dedicaran a la producción de semillas transgénicas. En 1999, la SAGARPA, a través de la Subsecretaría de Agricultura, implementó una moratoria *de facto* a la siembra experimental y comercial del maíz, la cual se mantuvo vigente hasta el 6 de marzo de 2009.

Posteriormente, algunas disposiciones del Reglamento de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (OGM) permitieron la entrada de maíz transgénico a territorio mexicano (González-Merino y Castañeda-Zavala, 2019).

Después de levantarse la moratoria, en México se concedieron permisos a multinacionales, con la condición de que, mediante protocolos de bioseguridad, se evitara la propagación de polen y semilla transgénica. Esta restricción les permitiría experimentar con maíz transgénico en campos de cultivo de estados como Tamaulipas, Sinaloa, Sonora y Chihuahua (Tarrío-García et al., 2003; González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014).

En septiembre del 2001 se dio un hecho inevitable, el maíz nativo fue contaminado con maíz transgénico, esto a pesar de las restricciones impuestas. Las principales zonas afectadas fueron la sierra norte de Oaxaca y ciertas comunidades de Puebla. Algunas instituciones, como el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y la Comisión Nacional de Biodiversidad (CONABIO), confirmaron la situación (De Ita, 2012). Estos acontecimientos demostraron que, a pesar de la moratoria y los protocolos de bioseguridad, la contaminación transgénica del maíz podría afectar la seguridad alimentaria y la agricultura del país.

A su vez, la promulgación de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM) en 2005 y la nueva Ley Federal de Producción, Certificación y Comercio de Semillas en 2007 ha tenido un impacto directo en los campesinos mexicanos y en el sistema de producción de alimentos en el país. Sin embargo, algunas opiniones indican que las normas no protegen los derechos e intereses de los pequeños productores, tampoco a la biodiversidad agrícola; por lo que solo hay beneficios para grandes empresas dedicadas a actividades agrobiotecnológicas. Algunos aspectos que se cuestionan directamente son: a) la propiedad intelectual, que puede restringir el acceso y el intercambio de semillas transgénicas patentadas, lo que limita a los pequeños productores para guardar, intercambiar y utilizar las semillas en sus prácticas agrotradicionales; b) etiquetado de transgénicos, ya que estas leyes son laxas y no garantizan una adecuada información al consumidor que no logra interpretarla ni decidir sobre la compra del producto; c) certificación de semillas, debido a que las leyes obligan a la certificación de semillas nativas y de origen agro tradicional, lo que implica requisitos y costos adicionales para los pequeños productores, así como restricciones al libre intercambio y comercialización de semillas.

Estas críticas señalan que estas leyes pueden favorecer el modelo de agricultura industrial y el control de las empresas agrobiotecnológicas sobre la producción y distribución de semillas, en detrimento de la diversidad agrícola, la soberanía alimentaria y los derechos de los pequeños productores. En 2011, en los estados de Tamaulipas y Nuevo León, se realiza la primera siembra piloto de maíz transgénico (maíz amarillo), a finales del 2012 el número de solicitudes para este mismo procedimiento iba en aumento, con aproximadamente 18 solicitudes pendientes en fase comercial para este tipo de maíz (Vicente, 2011).

En 2020, se publica el decreto en México que prohíbe el uso de maíz genéticamente modificado para la alimentación humana, así como el uso del herbicida glifosato. En este decreto se citan investigaciones científicas internacionales, para respaldar la postura fundamentada por un amplio expediente, donde la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM), un organismo dependiente del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) de México, ha publicado sobre el tema (Gobierno-México, 2023). Para el 2023, se hace una modificación del decreto, estableciendo una fecha límite para el cumplimiento de esta medida en el 2024. Esta modificación amplía las fechas de prohibición y limita su alcance únicamente al consumo humano, no afectando la importación de maíz genéticamente modificado para forraje u otros usos industriales (Luna-Méndez, 2023).

La razón detrás de estos cambios tiene sus raíces en las presiones ejercidas por Estados Unidos, principal productor y exportador de maíz; así como de paquetes de agroquímicos y semillas. Estas presiones se han manifestado a través de mecanismos incorporados en el Tratado de Libre Comercio entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). Esta disputa pone de manifiesto la complejidad y los desafíos que implica el equilibrio entre los intereses comerciales, la seguridad alimentaria, la protección de la salud humana y el medio ambiente.

Aplicación de la legislación alimentaria en el manejo integral del maíz

El maíz es un elemento central y objeto de seguridad alimentaria del mundo. Los productores son parte fundamental de la política del actual gobierno y, además, incluye algunos programas prioritarios que se enfocan principalmente en asegurar la alimentación. Algunos son parte de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), Producción para el Bienestar, Precios de Garantía y Canasta Básica, así como el rescate del campo, que permitan la aplicación de prácticas sustentables por medio de un diálogo de saberes entre el conocimiento campesino y el científico.

México ha tomado la decisión, a través de un decreto modificado en 2023, de prohibir temporalmente el maíz transgénico para la alimentación humana y restringir el uso del herbicida glifosato, por sus antecedentes de carcinogenicidad, buscando salvar la seguridad en la alimentación de la población, así como la protección de la biodiversidad de los cultivos (Gobierno-México, 2023). Estas decisiones son resultado de una compleja interacción entre factores económicos, políticos y ambientales, y reflejan las tensiones entre la producción agrícola industrial y los modelos de agricultura más sustentables y tradicionales. Respaldados los derechos por la Constitución Mexicana, existe un decreto que reconoce la obligación del Estado de garantizar el consumo de alimentos nutritivos, suficientes y de calidad, que satisfagan las necesidades fisiológicas de la población y procuren su salud. Estos principios deben ser respetados e implementados en México, tanto en el maíz que exporta como en el que autoabastece a su población.

En relación con la prohibición del uso de glifosato y otros agroquímicos que lo contengan para el 2024, el decreto hace referencia a investigaciones científicas que han señalado sus efectos nocivos en la salud, el medioambiente y la biodiversidad. Este ha sido identificado como disruptor endócrino y probable carcinogénico en humanos por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC-OMS).

Estas menciones, resaltan la importancia de proteger la salud de la población y el medioambiente frente a los posibles riesgos asociados al uso de agroquímicos, como el glifosato (Pérez, 2022).

Es importante destacar que existen diferentes perspectivas y posturas sobre los cultivos transgénicos y el uso del glifosato. Mientras unos están a favor de su uso y sostienen que son seguros y beneficiosos, otros expresan preocupaciones sobre los posibles impactos en los humanos y ecosistemas. El hecho de que el decreto haya sido publicado, bajo amenaza de dirimir el tema en el panel de violaciones al T-MEC, refleja las tensiones comerciales y las disputas que pueden surgir en el ámbito internacional cuando los países toman decisiones relacionadas con regulaciones y políticas agrícolas.

Uno de los principales objetivos del gobierno es la protección del consumidor y promover un cuidado medioambiental. Esto da pie a que el país garantice que los mexicanos tengan acceso a una alimentación sana. Por tales motivos, en 2024 se aprobó la Ley General de la Alimentación Adecuada y Sostenible con el fin de asegurar el derecho a una alimentación adecuada en todo momento, así como el acceso físico y económico para una alimentación inocua. Con bases científicas, el gobierno mexicano ha publicado el decreto que prohíbe el maíz transgénico y el uso del glifosato, con el objetivo de generar entornos alimentarios sostenibles.

Conclusiones

El maíz proporciona identidad a los mexicanos, posee un elevado aporte nutricional e impacto económico-social. La normatividad y legislación vigente establece especificaciones para garantizar la calidad e inocuidad, mantener y preservar una adecuada comercialización, no solo de los maíces nativos o criollos. La concienciación a la sociedad sobre este recurso es importante para contribuir a la soberanía alimentaria por medio de políticas públicas que fomenten una producción sustentable que diversifique sus usos tradicionales y emergentes. Por otro lado, el maíz transgénico representa una alternativa para satisfacer la demanda de este alimento, considerando su impacto económico, ambiental y social, así como los retos normativos en cuanto a su producción y comercialización.

Referencias

- Agama-Acevedo, E., Ottenhof, M. A., Farhat, I. M., Paredes-López, O., Ortiz-Cereceres, J. y Bello-Pérez, L.A. (2004). Efecto de la nixtamalización sobre las características moleculares del almidón de variedades pigmentadas de maíz. *Interciencia*, 29(11), 643-649.
- Álvarez-Buylla, E. y Piñeyro, A. (2008). Riesgos y peligros de la dispersión de maíz transgénico en México. *Revista Ciencias de la UNAM*, 92, 83-96.
- . (2013). *El maíz en peligro ante los transgénicos. Un análisis integral sobre el caso de México*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades.
- Bartra, A. (2009). Hacer milpa. *Ciencias*, 92-93(092), 42-45. <https://www.aacademica.org/armando.bartra/49>
- Caballero-García, M. A., Córdova-Téllez, L. y López-Herrera, A. I. de J. (2019). Empirical validation of the multicentric theory on the origin and diversity of maize in Mexico. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(4), 357-366.
- Carrillo, C. (2009). El origen del maíz. Naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92-93(092), 4-13.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2023, 5 de junio). *La colección de maíz más importante del mundo cumple 80 años*. <https://www.cimmyt.org/es/noticias/la-coleccion-de-maiz-mas-importante-del-mundo-cumple-80-anos/>
- Codex Alimentarius (1985). *Standard for whole maize (corn) meal* (CXS 154-1985). Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B154-1985%252FCXS_154e.pdf
- De Ita, A. (2012). La defensa internacional del maíz contra la contaminación transgénica en su centro de origen. *El Cotidiano*, (173), 57-65.
- Domínguez, D.I. (2015). La soberanía alimentaria como enfoque crítico y orientación alternativa del sistema agroalimentario global. *Pensamiento Americano*, 8(15), 146-175.
- Gobierno de México. (2023, 13 de octubre). *Decretos que establecen diversas acciones en materia de glifosato y maíz genéticamente modificado*. Secretaría de Educación Pública. <https://www.gob.mx/sep/acciones-y-programas/decretos-que-establecen-diversas-acciones-en-materia-de-glifosato-y-maiz-geneticamente-modificado>
- González-Merino, A. y Ávila-Castañeda, J. F. (2014). El maíz en Estados Unidos y en México: Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos*, 27(75), 215-237. UAM-Xochimilco.
- González-Merino, A. y Castañeda-Zavala, Y. (2019). Bioseguridad en biotecnología agrícola en México. La política del Estado y el papel de las organizaciones sociales. *Sociológica*, 34(97), 183-213.

- Gual-Díaz, M., Rendon-Correa, A. y Mariaca, R. (2020). Especies vegetales con uso combustible por comunidades rurales mexicanas. *Revista Etnobiología*, 18(3), 113-135.
- INIFAP -Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-. (2020, 29 de septiembre). *El maíz, base en la seguridad alimentaria del mundo: Agricultura. Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/el-maiz-base-en-la-seguridad-alimentaria-del-mundo-agricultura#:~:text=El%20ma%C3%ADz%20es%20el%20elemento,detall%C3%B3%20el%20titular%20de%20Agricultura>
- Jácome, A. G. (2003). *Cultura y agricultura: transformaciones en el agro mexicano*. Universidad Iberoamericana A.C. <https://books.google.com.mx/books?id=dIW-E3NEnFsC>
- Jácome, G. y Montes, R. (2014). El conocimiento agrícola tradicional, la milpa y la alimentación: el caso del Valle de Ixtlahuaca, Estado de México. *Revista de Geografía Agrícola*, (52-53), 21-42.
- Luna-Méndez, N. (2023). La defensa contra el maíz transgénico, sus efectos en la reproducción social. *Alianzas y Tendencias BUAP*, (26), 1-3. doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.8041540>
- Luna, B. M. y Reyes, J. A. (2015). Maíz transgénico: ¿Beneficio para quién? *Estudios Sociales (Hermosillo, Son.)*, 23(45), 141-161.
- Nadal, A. y Wise, T. A. (2004). Los costos ambientales de la liberalización agrícola: El comercio de maíz entre México y EE.UU. en el marco del NAFTA. En *Globalización y medio ambiente: Lecciones desde las Américas*. Boston University.
- NOM-247-SSA1-2008. Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. *Diario Oficial de la Federación*. Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. México, D. F.
- Oseguera, D. y Ortega, R. (2016). Gente de maíz. Historia y diversidad en la cocina mexicana del maíz. En *El maíz nativo en México. Una aproximación crítica desde los estudios rurales*. Rural México UAM-Lerma y Juan Pablos Editores.
- Pérez, G. C. (2022, del 25 al 27 de mayo). El caso del glifosato y su impacto en la gestión de la Infraestructura Verde urbana [conferencia]. *48° Congreso de Parques y Jardines Públicos PARJAP. Bosques Urbanos: la trama verde para la ciudad sostenible*, Zaragoza, España.
- Secretaría de Bienestar. (2019, 26 de septiembre). *Maíz, la planta sagrada de México para el mundo*. <https://www.gob.mx/bienestar/es/articulos/maiz-la-planta-sagrada-de-mexico-para-el-mundo?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020, 22 de julio). *Maíz el cultivo de México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-el-cultivo-de-mexico>

- Tarrío-García, M., Comboni-Salinas, S., Hartman, C. E. y Fernández-Tarrio, R. (2003). La apropiación de la vida. Derechos de propiedad intelectual, países ricos y grandes consorcios. *Centro de Estudios Superiores de México y Centroamérica*, (anuario), 325-371.
- Vicente, A.S. (2011). El avance de los transgénicos en México: ¿Compromiso del gobierno con Monsanto? *Análisis Plural*, (segundo semestre), 151-171. [http://www.amer.org.mx/articulosSeminarios/2012/Adelita_El avance_ transgenicos.pdf](http://www.amer.org.mx/articulosSeminarios/2012/Adelita_El%20avance_transgenicos.pdf)
- Yeverino, G. M., Arteaga, M. G., Gracia, V. Y. y González, T. M. (2007). Comparación de la calidad de la tortilla elaborada en autoservicios y en tortillerías [conferencia]. *IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, Guanajuato, México.

Capítulo 5

Resistencia del maíz a estrés biótico y abiótico

Zoila Reséndiz Ramírez¹
Manuel Alvarado Carrillo¹
Hipólito Castillo Tovar¹

Resumen

El maíz es parte de la alimentación básica de los humanos y de diferentes tipos de ganado, además de tener múltiples aplicaciones y productos derivados. Este cultivo posee una alta diversidad genética que le permite adaptarse y ser cultivado en diversos ambientes; sin embargo, algunos factores impiden la expresión de su potencial. El “estrés vegetal” se debe a una gran variedad de factores bióticos y abióticos, en este caso, se estresa cuando enfrenta condiciones ambientales que dificultan su crecimiento, desarrollo y calidad. Estos factores involucran organismos vivos que interactúan con la planta, ya sea de manera directa o indirecta. El estrés biótico en el maíz se refiere a condiciones fuera del nivel óptimo provocadas por plagas, enfermedades y malezas que tienen un efecto negativo en su crecimiento y desarrollo. Mientras que el estrés abiótico se refiere a las condiciones ambientales no vivas, estos factores incluyen principalmente el clima y las condiciones del suelo, donde los más comunes son sequías, exceso de agua o anegamiento, temperaturas extremas, salinidad del suelo, deficiencia o exceso de nutrientes y exceso de radiación solar. Los efectos negativos sobre la planta de maíz son la interrupción de la floración y la polinización, reducción de la fotosíntesis, crecimiento limitado, disminución de la productividad, susceptibilidad a plagas y, ya en extremos, la muerte de las plantas. Para aminorar estos efectos, se pueden implementar híbridos de maíz resistentes a sequías o temperaturas extremas, así como utilizar tecnologías que mejoren la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes. Estas estrategias favorecen el desarrollo de las plantas y su potencial genético. En este capítulo, se analizan los factores relacionados con el estrés biótico y abiótico que afectan al maíz. También se estudian las estrategias para reducir el impacto en el cultivo.

¹ Campo Experimental Río Bravo Tamaulipas-INIFAP. Carretera Matamoros-Reynosa, km 61 Cd. Río Bravo, Tamaulipas. Correo: resendiz.zoila@inifap.gob.mx

Introducción

El maíz es un cereal de alta importancia a nivel mundial. Es un alimento básico para los seres humanos y para los animales, ya que aporta nutrición y fibra a la dieta (González, 2022). En las últimas décadas, ha incrementado su relevancia en la elaboración de biocombustibles y como materia prima en la industria farmacéutica, cosmética, etcétera (Arvizu, 2011). México es el país donde se encuentra la mayor diversidad genética y fenotípica de maíz, representada por 64 razas. Esta cultivo se adapta en un amplio rango de altitudes y diferentes ambientes.

Cuando se altera el equilibrio derivado de los procesos de autorregulación (homeostasis, o balance en las células), se presenta estrés vegetal. En algunos sitios, las poblaciones de maíz pueden mostrar susceptibilidad al estrés biótico y abiótico debido a una combinación de factores genéticos, fisiológicos y ambientales que influyen en su capacidad para adaptarse y resistir a condiciones adversas (Vidal-Martínez et al., 2010). Estas condiciones pueden extenderse desde segundos hasta días, y durante este periodo, la planta utiliza fotosintatos para protegerse frente a estas adversidades, lo que implica una pérdida de recursos y energía. Hay una enorme cantidad de elementos que provocan el estrés vegetal, y las plantas no siempre tienen la capacidad de respuesta ante estos eventos (García, 1998). Generalmente tienen una adaptación específica, y si el ambiente presenta una variación que le afecta, el estrés es demasiado severo o prolongado y pueden experimentar un debilitamiento o incluso la muerte.

Como parte de su evolución, las plantas han desarrollado numerosos mecanismos de defensa y adaptación para hacer frente a situaciones que alteran su estabilidad (Méndez-Espinoza y Vallejo, 2019). Estos pueden ser de carácter físico, químico o biológico. Por ejemplo, la producción de compuestos químicos defensivos actúa como repelente de plagas y patógenos. Estos compuestos, conocidos como metabolitos secundarios, inhiben el crecimiento de los patógenos o disuaden a los herbívoros. El maíz tiene compuestos como el ácido salicílico (Setotaw et al., 2024), además de los fenólicos y terpenos que ayudan a disuadir a los insectos y a otros organismos herbívoros, de igual forma a los patógenos (Matías y García-Montalvo, 2016). Por otra parte, la resistencia estructural se refiere a cuando las plantas presentan estructuras físicas, como espinas, tricomas, es decir, vellos microscópicos o una cutícula más gruesa, que dificultan el acceso o la alimentación de las plagas (Ordeñana, 2002). La simbiosis con microorganismos hace alusión a cuando la planta se asocia con bacterias u hongos beneficiosos, que ayudan a proteger sus raíces de patógenos dañinos, como los hongos fitopatógenos, mediante competencia o la producción de compuestos antimicrobianos (Ramírez y Rodríguez, 2012).

Dentro de los mecanismos para resistir al estrés abiótico se encuentra el cierre de estomas, que reduce la pérdida de agua durante las condiciones de sequía. Otro mecanismo es el desarrollo de raíces más profundas para acceder a fuentes de agua en el suelo. Cuando se presentan temperaturas extremas, las plantas se protegen mediante sus membranas celulares. En climas fríos, producen compuestos llamados crioprotectores, que previenen la congelación del agua en las células. En entornos calurosos, pueden sintetizar proteínas de choque térmico para proteger sus estructuras celulares del daño (Wang et al., 2003). Cuando hay salinidad en el suelo, algunas plantas logran adaptarse acumulando sal en las vacuolas celulares, lo que les permite mantener el equilibrio osmótico sin afectar sus células (Paul y Roychoudhury, 2018). En otros casos, pueden expulsar el exceso de sal a través de glándulas especializadas en sus hojas. Si el problema es la radiación solar, las plantas ajustan la orientación de sus hojas para minimizar su exposición a la luz intensa. Otro mecanismo de defensa es la precocidad, que consiste en acelerar su ciclo biológico para completar su desarrollo en condiciones favorables y así evitar periodos de tensión ambiental (Venkateswarlu et al., 2011). Estos mecanismos permiten a las plantas sobrevivir y prosperar en una variedad de condiciones ambientales, aunque algunos factores de estrés pueden superar sus capacidades de adaptación, crecimiento y rendimiento.

Las estrategias de manejo del cultivo incluyen la selección de variedades resistentes, la implementación de técnicas de riego eficientes y la aplicación de coberturas vegetales sobre el suelo para reducir la evaporación del agua y mantener una temperatura más constante. Además, la fertilización de las plantas contribuye a mejorar su resistencia al estrés y asegurar un buen crecimiento en condiciones adversas (Jeuffroy y Ney, 1997). La incorporación de microorganismos beneficiosos, como bacterias y hongos, estimula el crecimiento de las plantas y las protege contra patógenos, reduciendo el impacto de enfermedades y plagas sin recurrir a químicos agresivos (He et al., 2021). Asimismo, el uso combinado de prácticas biológicas, culturales, químicas y mecánicas permite controlar plagas y enfermedades de manera eficiente, reduciendo la presión biótica sobre las plantas. Por otro lado, el establecimiento de sistemas agroecológicos y de cultivo intercalado reduce el riesgo de plagas y mejora la capacidad de adaptación de las plantas ante condiciones ambientales adversas (Altieri et al., 2015). Las estrategias anteriores, junto con las respuestas naturales de las plantas, reducen el impacto del estrés, aumentan su resiliencia frente a situaciones climáticas desfavorables y promueven un desarrollo productivo más eficiente.

El cultivo de maíz ha sido investigado para identificar las estrategias de resistencia y adaptación que le permitan afrontar estos desafíos. En este contexto, el desarrollo de variedades de maíz resistentes al estrés biótico y abiótico es crucial para lograr la seguridad alimentaria frente a los cambios climáticos y a la presión de enfermedades emergentes (Badu-Apraku et al., 2023), favoreciendo el establecimiento de múltiples sistemas de manejo y de diferentes niveles tecnológicos en el cultivo de maíz.

Factores que ocasionan estrés vegetal

El estrés en la planta es un estado de tensión donde no puede llevar a cabo sus funciones fisiológicas, aunque en general esté adaptada y sea flexible a las condiciones ambientales cambiantes debido al metabolismo celular y respuestas fisiológicas propias (Bohnert y Sheveleva, 1998; García, 1998). Las plantas enfrentan desafíos que afectan su desarrollo y producción. Entre los más comunes se encuentran las plagas y enfermedades (estrés biótico), y por factores como la sequía, las heladas, salinidad, entre otros (abióticos). Se estima que las condiciones de estrés vegetal provocan pérdidas económicas de hasta el 50 % para el agricultor y un aumento general en los precios de los alimentos, repercutiendo en toda la sociedad (Mishra y Singh, 2010). El calentamiento ha provocado condiciones climáticas extremas que no se habían presentado antes, con fenómenos como “El Niño” o “La Niña” que afectan la producción de alimentos a nivel local, nacional y mundial (López y Hernández, 2016).

Los factores que originan estrés en las plantas se pueden dividir en bióticos y abióticos. Los primeros son provocados por otros seres vivos, por ejemplo: insectos, plagas, malezas, hongos, bacterias, nematodos, virus, entre otros. Estos organismos componen el ecosistema y obtienen sus requerimientos de diferentes maneras, por lo que, al haber desequilibrio, el daño puede incrementarse.

Por otra parte, los factores abióticos son provocados por variables climáticas, físicas o químicas, como: temperatura, sequía, suelos poco fértiles, salinidad del suelo, manejo agronómico, nivel de tecnología, entre otros. Además, la influencia del cambio climático agrava el problema, provocando lluvias erráticas, incremento de temperatura, heladas fuera de temporada, huracanes más agresivos, etcétera.

Factores bióticos que provocan estrés en el maíz

Insectos plaga

De manera general, existe un gran número de insectos plaga que afectan al maíz, dependiendo de las condiciones agroecológicas de la región en donde se establece el cultivo y el estado fenológico de la planta. Los lepidópteros, son los insectos plaga más importantes en las regiones tropicales y subtropicales, presentan una alta capacidad reproductiva y de infestación, son voladores, conocidos coloquialmente como mariposas o palomillas, que en su estado larvario provocan daño en el cultivo de maíz. El gusano soldado (*Spodoptera exigua*), gusano elotero (*Helicoverpa zea*), gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) (Figura 1), son los de mayor importancia (Blanco et al., 2014). Sin embargo, también puede ser afectado por barrenadores (*Diatraea saccharalis* y *Eoreuma loftini*), aunque en la zona noreste de México son poco comunes.

La araña roja (*Tetranychus urticae*) es un ácaro que se alimenta de la savia en las hojas, provoca manchas amarillentas muy pequeñas, pero si hay una alta infestación se forman manchas cloróticas, necróticas o las plantas toman aspecto bronceado, y el daño acumulado puede provocar defoliación y muerte de las plantas (Chaires-Grijalva et al., 2022).



Figura 1. *Helicoverpa zea* o gusano elotero (1). Daño provocado por gusano elotero (2)

Fuente: imágenes tomadas por el M.C. Víctor Maya Hernández (2023).

Hongos que afectan al maíz

Los hongos fitopatógenos que afectan el cultivo de maíz provocan diversas enfermedades que disminuyen el crecimiento, desarrollo y rendimiento de la planta. El desarrollo de estas enfermedades depende de las condiciones ambientales, capacidad de resistencia de los genotipos y el estado fenológico del cultivo. Entre los hongos más importantes que afectan al maíz se encuentra *Puccinia sorghi*, responsable de la roya común. Este patógeno provoca necrosis en el tejido foliar, se presenta con mayor severidad durante la floración (Díaz et al., 2019). El rango de temperatura

óptimo para el desarrollo de la roya común del maíz es entre 15 °C y 25 °C. Sin embargo, el hongo puede desarrollarse desde los 10 °C hasta 30 °C (Zúñiga, 2018).

El hongo *Exserohilum turcicum* causa el tizón de la hoja, que se caracteriza por la presencia de lesiones elípticas en ellas. Las plantas infectadas presentan manchas alargadas de color marrón claro a grisáceo, con bordes amarillentos. A medida que la enfermedad progresa, las manchas se expanden, fusionándose en áreas de color marrón oscuro o negruzco, con una zona central a menudo más clara que indica la presencia de esporas. Las condiciones de alta humedad y temperaturas cálidas favorecen su rápida expansión, lo que lleva a la necrosis de las hojas y la pérdida de funcionalidad fotosintética. En etapas avanzadas, las hojas afectadas muestran síntomas de necrosis generalizada y deshidratación (Felix-Gastelum et al., 2018). La enfermedad se desarrolla en sentido acrópeto, inicia en las hojas inferiores y avanza hacia las superiores. La infección se desarrolla en condiciones de temperaturas entre 18 y 22 °C y alta humedad relativa, precipitación constante y presencia de rocío (Johnson y Hoy, 2006).

Por otro lado, están los hongos con potencial micotoxigénico, que afectan al grano de maíz en cualquier etapa de desarrollo de la mazorca y pertenecen a los géneros *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*. Estos producen metabolitos secundarios capaces de causar micotoxicosis y afectan la salud humana y animal (Carvajal-Moreno, 2021). Las micotoxinas producidas por hongos del género *Aspergillus*, *A. flavus*, *A. parasiticus* y *A. nomius*, son aflatoxina con potencial carcinogénico (Goessens et al., 2024). Cuando se realiza la cosecha y existe un mal manejo de los residuos, quedando plantas infectadas, se corre el riesgo de contaminación en la siguiente siembra, pues las esporas pueden sobrevivir por años en el suelo (Arcos, 2009). En la Figura 2 se pueden observar mazorcas con daño provocado por el hongo *Aspergillus*, y otra afectada por el *Ustilago maydis* o huitlacoche.



Figura 2. Daño de mazorca de *Aspergillus* y *Ustilago maydis* o huitlacoche

Fuente: imágenes tomadas por el M.C. Víctor Maya Hernández y la M.C. Rebeca Rodríguez.

Virus

Los virus provocan daños económicos y enfermedades en las plantas. El maíz, como muchos otros cultivos, tiene susceptibilidad a una gran variedad de infecciones (Rodríguez et al., 2023), dependiendo del área y los genotipos.

Estos patógenos dependen de sus hospedantes para reproducirse, complicando su eliminación sin dañar a la planta. Las que son silvestres presentan tolerancia o resistencia natural a muchos patógenos (Tiffin y Moeller 2006); de igual forma, cuando una población vegetal tiene variabilidad, puede hospedar fitopatógenos, aunque algunas no presentarán síntomas y terminarán su desarrollo de manera normal (Agrios, 2005). Otras plantas, presentarán síntomas con bajo o alto nivel de severidad y, en consecuencia, solo se obtendrá una disminución de la producción de biomasa. Este proceso de selección natural favorecerá poblaciones con mayor tolerancia o resistencia a este tipo de fitopatógenos. En la Tabla 1 se muestran algunas enfermedades ocasionadas por virus.

Tabla 1. Enfermedades del maíz tropical provocadas por virus y su sintomatología

Nombre común de la enfermedad	Nombre del vector	Sintomatología
Virus del rayado fino del maíz	<i>Dalbulus maidis</i>	Aparición de pequeñas manchas cloróticas y aisladas. Posteriormente las manchas incrementan y se fusionan, formando rayas de 5 a 10 cm a lo largo de las nervaduras.
Virus del achaparramiento del maíz (<i>Spiroplasma kunkelii</i>)	<i>Dalbulus maidis</i>	Provoca enanismo y sufren malformaciones fisiológicas, las mazorcas se deforman no se desarrollan de manera correcta.
Virus del mosaico del maíz	<i>Szichaphis graminum</i> , <i>Rhopalosiphum maidis</i> y <i>Rhopalosiphum padi</i>	Aparición de manchas en las hojas, que muestran un patrón moteado o en mosaico. Lo anterior, provoca crecimiento y desarrollo deficiente de la planta, en casos extremos llega a provocar la muerte de las plantas.

Fuente: programa de maíz del CIMMYT (2004).

Las interacciones entre virus-hospedero están ampliamente distribuidas y son cruciales en la evolución de virus. Los daños a los cultivos debido a patógenos pueden prevenirse si se identifican a tiempo (Aguilera et al., 2019).

Malezas

Se considera maleza a cualquier planta que emerja dentro de una plantación, que no tenga interés económico y, a su vez, compita con el cultivo por agua, luz, espacio y nutrientes (Rosales y Robles, 2006). El tipo de malezas presentes en cada lugar dependerá de las condiciones ambientales. El maíz puede establecerse en diversos ambientes; sin embargo, las plantas adaptadas a la zona pueden afectarlo y competir con el cultivo hasta provocar pérdidas importantes en el rendimiento si no se controlan.

En Tamaulipas, la maleza de hoja ancha es la más común. Algunos ejemplos son el quelite (*Amaranthus* spp.), el polocote (*Tithonia tubaeformis*), la hierba amargosa (*Parthenium hysterophorus*), el trompillo (*Solanum elaeagnifolium*) y la correhuela (*Convolvulus arvensis*). También se encuentran malezas de hoja angosta, como los zacates pinto y Johnson (*Sorghum halapense*), entre otros (Rosales y Robles, 2006). Las malezas se controlan con productos químicos, cuyo uso excesivo puede generar resistencia a los herbicidas (Taberner, 2013) y convertirse en un problema mayor para el desarrollo del cultivo. Por ello, es fundamental implementar un manejo adecuado para controlar las poblaciones que resistan o toleren estas plantas.

Con el apoyo de la biotecnología, la biología molecular y la genómica, se han desarrollado técnicas para identificar y manipular genes con el objetivo de erradicar las malezas en el campo (Perotti et al., 2020). Un ejemplo es el maíz modificado genéticamente para resistir el glifosato, uno de los agroquímicos más utilizados en los sistemas de producción de maíz. Cuando el herbicida se aplica sobre el campo, elimina las malezas sin afectar las plantas de maíz transgénicas. Este método permite un control más eficiente de las malezas sin recurrir a prácticas mecánicas o químicas más agresivas. Sin embargo, es preocupante el aumento de la resistencia de las malezas al glifosato, así como los posibles impactos ambientales y riesgos para la salud a largo plazo (Owen y Zelaya, 2005). En México, el uso del glifosato ha sido objeto de controversia y debate. Diversos grupos y comunidades han expresado preocupaciones sobre sus posibles efectos negativos y han abogado por su prohibición o restricción.

Factores abióticos que provocan estrés en el maíz

Temperatura

El maíz es muy sensible a la temperatura, que interviene de manera positiva o negativa en el rendimiento del cultivo, además de influir durante todas las etapas de desarrollo.

Singh et al. (1976) mencionan que el crecimiento del maíz generalmente ocurre cuando la temperatura ambiente está en el rango de 10 y 35 °C, pero puede variar de acuerdo con el genotipo utilizado. Por ejemplo, temperaturas fuera de estos rangos y por tiempo prolongado, como una acumulación de temperatura máxima superior a los 28 °C, el periodo de llenado de grano se acorta y, por tanto, el rendimiento disminuye (Lozano, 2021). Por otro lado, Hernández y Carballo (1984) estimaron la temperatura base del maíz para desarrollo de 7 °C. La baja temperatura está asociada con un letargo en el desarrollo de la planta y la reducción de la germinación, conforme disminuye de 25 a 8 °C; Revilla et al. (2000) asocian las bajas temperaturas con daño oxidativo a las membranas y muerte celular.

Además de la alta temperatura, se suma el estrés hídrico. El maíz resulta severamente afectado, pues a mayor temperatura más estrés por calor, causando daños irreversibles en su metabolismo y desarrollo (Tsfaye et al., 2018). El estrés por temperatura alta, durante la etapa de floración, afecta la polinización; por lo tanto, también a la fecundación de las florecillas femeninas y al rendimiento. Cabe resaltar que deben ser temperaturas extremas, de lo contrario, es muy baja la posibilidad de que esto suceda. La temperatura alta eleva la tasa de transpiración del maíz, por lo que el cultivo demanda mayor suministro de agua (Bolaños y Edmeades, 1993).

El maíz es muy sensible a las temperaturas, por ello se hace énfasis en tomar en cuenta las fechas de siembra más adecuadas en cada región donde se establece el cultivo. En la Figura 3, se observan plantas de maíz en un ambiente sin estrés por temperatura o hídrico, así como plantas con estrés.



Figura 3. A) Cultivo de maíz sin estrés hídrico y B) Cultivo de maíz con estrés hídrico

Fuente: fotografías tomadas por Zoila Reséndiz Ramírez (2024).

Temperatura baja y “heladas”

“Las heladas” son un fenómeno meteorológico que se refiere a que la temperatura es menor a 0 °C. Esta situación puede afectar al maíz, debido a que el aire desciende hasta formar cristales de hielo en el interior de las células vegetales. El daño de las plantas dependerá de la etapa de desarrollo en que se encuentre (Jasso-Miranda et al., 2022). Cuando se presentan estas condiciones en fechas tardías, como en primavera, o temprano, en otoño-invierno, pueden ser perjudiciales para los cultivos de maíz.

Los efectos de la temperatura extrema baja en el maíz dependerán de la duración y su severidad, así como de la resistencia del cultivo a esta condición. Los agricultores a menudo toman medidas preventivas para proteger el maíz de las heladas, como el riego para generar calor, cubrir las plantas para retener el calor del suelo o utilizar genotipos resistentes a las bajas temperaturas.

De forma natural, algunas plantas de maíz pueden recuperarse del paso de este fenómeno, con la llegada de temperatura más cálida, pero siempre dependerá del genotipo y la etapa fenológica en la cual sufrió la afectación.

Granizo

Otro fenómeno agresivo es el granizo, que tiene efectos devastadores en el cultivo de maíz. Cuando graniza, el hielo golpea las plantas con fuerza, causando daños físicos y afectándolas de manera general. Las lesiones en las hojas reducen la capacidad de la planta para fotosintetizar, lo que afecta su crecimiento y rendimiento (Tartachnyk y Blanke, 2002), quedando más susceptibles a enfermedades.

Las heridas causadas por el granizo pueden ser puntos de entrada para enfermedades fúngicas o bacterianas, lo que podría empeorar su salud. Hay una relación entre la cantidad de granos fecundados y la intercepción de radiación, medida quince días después de la floración (Andrade, 1996). Si el evento de granizo ocurre durante el periodo de llenado de grano se reduce su peso individual, debido a que disminuye el periodo de llenado de grano.

Los efectos del granizo en el maíz varían según la severidad, la etapa de crecimiento de la planta y la duración del evento. En la Figura 4 se muestra el caso de una parcela con maíz severamente afectado por el granizo, que sucedió durante abril del 2023 en Río Bravo, Tamaulipas. El hielo defolió casi en su totalidad a las plantas. De la misma parcela, se muestra la imagen de una mazorca en desarrollo, al momento del evento el cultivo se encontraba en la etapa de floración y llenado de grano. El impacto de los trozos de hielo dañó la mayoría de las flores masculinas y quedó inconclusa la polinización, lo cual generó casi pérdida total, aparte de que las mazorcas en formación quedaron con daños evidentes en sus brácteas.



Figura 4. Daños provocados por granizo en plantas de maíz en Río Bravo, Tamaulipas, en 2023

Fuente: fotografías de la M.C. Rebeca Rodríguez Falconi (2023).

El nivel de resistencia de los genotipos o cultivares de maíz ante esta tensión radica en la capacidad de las plantas para evitar el estrés mediante ángulos amplios de inserción de la hoja, es decir, en su arquitectura. Además, el manejo adecuado de la fertilización es clave para la reestructuración celular y la recuperación de las plantas.

Restricción de humedad o sequía

La restricción de humedad provoca un desarrollo deficiente del maíz y, en algunos casos de cultivo temporal, puede ocasionar la pérdida total de la producción. Este es uno de los fenómenos que más daña al maíz. Algunos síntomas comunes incluyen hojas marchitas o enrolladas, menor crecimiento de la planta, tallos delgados y quebradizos, inflorescencias pequeñas y un impacto negativo en la formación de grano (Avendaño-Arrazate et al., 2008). Durante la floración, este tipo de estrés reduce el número de granos, ya que el embrión se aborta o el polen puede volverse estéril. Esto ocurre porque el déficit hídrico inhibe la fotosíntesis y disminuye la producción de fotoasimilados, esenciales para el desarrollo de los órganos reproductivos (Boyer y Westgate, 2004). Asimismo, Hall et al. (1982) mencionan que el estrés hídrico durante esta etapa también incrementa la asincronía entre la floración masculina, que corresponde a la liberación de polen, y la floración femenina, que implica la emergencia de los estigmas. Esto provoca fallas en la polinización y, por lo tanto, una menor cantidad de granos fecundados.

El impacto de la restricción de humedad en el rendimiento del grano de maíz depende de su intensidad, duración y la etapa fenológica en que ocurra (Ibarra et al., 2021). Como se observa en la Figura 5, el maíz experimentó un periodo prolongado de sequía, lo que resultó en una baja acumulación de biomasa y la ausencia de mazorcas en algunas plantas.



Figura 5. Efectos de una sequía prolongada sobre maíz nativo en Antiguo Morelos, Tamaulipas

Fuente: fotografía tomada por Zoila Reséndiz Ramírez (2023).

Salinidad del suelo

En algunas regiones, existe otro problema que también afecta severamente al maíz en los diferentes sistemas agrícolas: la salinidad del suelo (Gómez-Padilla et al., 2017). Es un proceso en donde el suelo tiene sales más solubles que el sulfato de calcio, principalmente son cloruros y sulfatos de sodio y magnesio. Esto provoca valores muy altos de la presión osmótica en el agua del suelo, lo que afecta su crecimiento y desarrollo (Porta et al., 1999).

Los síntomas de las plantas de maíz, en esta condición, incluyen un periodo de germinación más tardado, afectación en la longitud de la raíz, deshidratación de los tejidos (Mansour et al., 2005), inadecuado crecimiento de las plantas, porte bajo, menos hojas y disminución de la biomasa fresca, debido a los niveles de sodio en el suelo (Sangoquiza et al., 2021).

Las plantas se van adaptando a diferentes ambientes y situaciones de estrés, y han desarrollado numerosos mecanismos que permiten minimizar los efectos sufridos por estos procesos, dentro de los límites de la tolerancia del cultivo. La importancia de tener una amplia diversidad genética es que hay un gran número de genes involucrados que responden de forma conveniente a estas condiciones (Zhu et al., 1997).

Deficiencia de nutrientes

Cuando el suelo carece de nutrientes, el maíz adquiere una morfología y coloración peculiares; además, se evidencian efectos en su desarrollo y crecimiento. Los nutrientes esenciales para el desarrollo óptimo del maíz son el nitrógeno, el fósforo y el potasio (N, P, K); sin embargo, también es importante que el suelo contenga micronutrientes (Havlin et al., 2023). Por otro lado, el uso continuo del suelo agrícola con el mismo cultivo en cada ciclo provoca la disminución de nutrientes, lo que deteriora el suelo. Para contrarrestar este efecto, se aplican fertilizantes químicos o se cultivan especies que aportan materia orgánica y nitrógeno al suelo, como el frijol y otras leguminosas. También se aplican abonos orgánicos que ayudan a recuperar parte de los nutrientes perdidos (Delgado y Salas 2006). Los síntomas de deficiencia en el cultivo de maíz cuando no hay suficiente N en el suelo incluyen amarillamiento o clorosis en las hojas y su eventual caída.

Cuando se presenta la deficiencia P, además de mostrar un crecimiento más lento y poco desarrollo de la raíz, en sus hojas se observa una coloración morada hacia las orillas de la lámina foliar. En el caso del K, los síntomas incluyen manchas cloróticas, amarillentas o necrosadas en los bordes de las hojas, pérdida de turgencia y menor tolerancia al estrés ambiental y las enfermedades (Fageria y Baligar 2005).

El manejo agronómico del maíz y el monitoreo constante pueden prevenir la disminución del rendimiento de grano o forraje. Algunos agricultores cultivan diversas variedades locales de maíz en un mismo sistema de cultivo para lidiar con el estrés y los riesgos de la producción agrícola en ambientes marginales (Figura 6).



Figura 6. Labranza tradicional en parcela de maíz nativo en Antiguo Morelos, Tamaulipas
Fuente: fotografía tomada por Zoila Reséndiz Ramírez (2023).

Mecanismos de defensa de las plantas contra el estrés biótico y abiótico

Las plantas se adaptan y desarrollan mecanismos de defensa contra los daños causados por diversas condiciones ambientales. Un ejemplo de estos mecanismos son las adaptaciones anatómicas, como la vellosidad o los tricomas, que limitan el ataque de algunos insectos plaga. Estos pueden actuar como barreras físicas que dificultan la alimentación de los insectos. Además, algunos tricomas secretan sustancias químicas desagradables para los herbívoros. De manera similar, las espinas funcionan como defensa física al dificultar o hacer más dolorosa la alimentación de los animales herbívoros. Algunas plantas desarrollan una cutícula más gruesa como barrera física adicional contra insectos y patógenos. Otras producen sustancias químicas que reducen la ingesta por parte de ciertos organismos, algunas de ellas con efectos antimicrobianos (INTAGRI, 2017; Camacho-Escobar et al., 2020). Asimismo, han desarrollado mecanismos de defensa contra el estrés abiótico (Tabla 2).

Tabla 2. Mecanismos de defensa y modo de acción de las plantas contra el estrés abiótico

Mecanismo de defensa	Modo de acción
Acumulación de osmolitos	Acumulación de sustancias como prolina, glicina betaína o azúcares solubles para mantener el equilibrio hídrico en condiciones de sequía o salinidad (García et al., 2005).
Sistema de antioxidantes	Producción de antioxidantes como superóxido dismutasa, catalasa y glutatión, para contrarrestar el estrés oxidativo causado por condiciones ambientales extremas como altas temperaturas o radiación ultravioleta (Peralta-Pérez y Volke-Sepúlveda, 2012).
Cierres estomáticos	En situaciones de estrés hídrico, ocurre el cierre de estomas para reducir la pérdida de agua por transpiración (Méndez-Espinoza y Vallejo, 2019).
Desarrollo de raíces más profundas	En condiciones de sequía prolongada, algunas especies pueden desarrollar raíces más profundas en busca de agua (Florido y Bao, 2014).

Fuente: elaboración propia.

Comprender estos mecanismos es importante para el desarrollo de estrategias agrícolas que ayuden a las plantas a resistir mejor el estrés y mejorar la producción en condiciones desfavorables.

Plasticidad del maíz

La plasticidad de las plantas es la capacidad que tienen para modificar su desarrollo y fisiología para adaptarse a diferentes ambientes. Este mecanismo favorece el cultivo en condiciones heterogéneas. La selección natural elimina las plantas no deseables y con características poco útiles, lo que da lugar a poblaciones más adaptadas y con mejores cualidades agronómicas para su entorno (Cadena-Zamudio et al., 2018).

La plasticidad del maíz se manifiesta en diferentes aspectos. Un ejemplo es su arquitectura, ya que la distribución de hojas, tallos y raíces varía según la densidad de siembra, la disponibilidad de luz y los nutrientes. En condiciones de alta densidad de población, la orientación de sus hojas cambia para obtener luz solar adecuada. Además, el maíz puede modificar su tasa de crecimiento, el número y tamaño de sus hojas, la formación de raíces y la producción de mazorcas, en respuesta a condiciones variables del ambiente, como la sequía o la disponibilidad de nutrientes o un cambio en las horas luz que reciben las plantas (Reyes-Matamoros y Martínez-Moreno 2001). Otro aspecto, es que el maíz puede activar diferentes respuestas fisiológicas para conservar agua en condiciones de sequía o maximizar la captación de nutrientes en suelos pobres (Sáenz et al., 2024).

La plasticidad es un factor clave para la supervivencia y el rendimiento del maíz en diferentes ambientes, ya que le permite adaptarse para optimizar su crecimiento y producción. Este fenómeno es evidente en poblaciones mejoradas de maíz, que presentan mayor resistencia y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales.

Genotipos de maíz mejorados como estrategia contra el estrés vegetal

La selección y modificación genética permite desarrollar cultivos más resistentes a condiciones de estrés, con variedades que toleren sequías, salinidad, plagas y enfermedades (Carvajal-Campos y Jiménez, 2021). En general, se busca mitigar estos efectos y reducir las pérdidas relacionadas con el estrés vegetal. Por ejemplo, un maíz tolerante a la sequía, que ha sido desarrollado para resistir o adaptarse a condiciones de poca disponibilidad de agua, minimizando los efectos negativos en su crecimiento y rendimiento. Cuando se habla de “maíz con resistencia al estrés hídrico” o “maíz tolerante al estrés abiótico”, se hace referencia a la capacidad de la planta para mantener su productividad a pesar de la falta de agua. La ingeniería genética o biotecnología se ha utilizado para insertar genes específicos que aumentan la tolerancia al estrés en las plantas. Esto incluye genes que producen proteínas que mejoran la respuesta de la planta a sequías o a la alta salinidad (Ashraf y Akram 2009).

En la Tabla 3, se muestran algunos de los híbridos mejorados para la zona centro y norte de Tamaulipas. Poseen características que muestran tolerancia o resistencia a factores de estrés, permitiendo un mejor rendimiento en estas condiciones. En el sur de Tamaulipas y en las áreas del altiplano, los agricultores utilizan poblaciones de maíz nativas o criollas adaptadas a la región (Pecina-Martínez et al., 2009; Reséndiz et al., 2014). Estos han coevolucionado gracias a la selección que realizan ciclo tras ciclo, lo que les ha permitido mejorar y conservar sus poblaciones de acuerdo con los fenómenos climáticos y la presencia de agentes bióticos.

Tabla 3. Híbridos de maíz mejorados tolerantes a diferentes tipos de estrés vegetal recomendados para el centro y norte de Tamaulipas

Híbrido de maíz	Características favorables contra el estrés
H-440 híbrido de INIFAP	Cuenta con características de tolerancia a sequía. Se adapta a condiciones favorables en siembras de riego y temporal de los ciclos P-V y O-I (Reyes et al., 2007).
P3057W de Pioneer	Para condiciones del norte de Tamaulipas y Abasolo. Es precoz, tiene tallos fuertes, lo cual favorece en la no preferencia de las plagas (Ficha técnica Pioneer, 2023).
Híbrido N83N5 de Syngenta	Es un material precoz, con buena cobertura de mazorca, tallos fuertes, la sanidad de la planta de manera general se clasifica como muy buena (Catálogo NK semillas).
NK925W híbrido de Syngenta	Con altura media, lo que ayuda a no ser acamado por el viento, de buen rendimiento, buena sanidad y calidad de grano. (Catálogo NK semillas).

Fuente: elaboración propia.

La problemática para conseguir híbridos o variedades de maíz mejorados que soporten el estrés biótico y abiótico es compleja y multifacética. Estos son algunos de los desafíos más importantes, porque en algunos lugares la diversidad genética del maíz es limitada debido a la selección intensiva durante la domesticación y el mejoramiento. El genoma del maíz es complejo y contiene muchos genes que interactúan entre sí, lo que hace difícil identificar y seleccionar genes específicos para la tolerancia al estrés (Carvajal-Moreno, 2021). Los factores ambientales, como la temperatura, la humedad y la radiación solar, pueden variar en diferentes regiones y años, lo que hace difícil desarrollar variedades que sean tolerantes a todos los

tipos de estrés (Méndez-Espinoza y Vallejo Reyna, 2019). Las interacciones entre los genes y el ambiente pueden afectar su expresión y la tolerancia al estrés, lo que hace difícil predecir el comportamiento de las variedades en diferentes condiciones ambientales. La selección de variedades tolerantes al estrés puede ser lenta y costosa, especialmente si se utiliza la selección tradicional. La identificación de marcadores moleculares, asociados con la tolerancia al estrés, es crucial para acelerar el proceso de selección, pero puede ser difícil encontrar marcadores específicos y confiables (Ribaut y Ragot, 2007). La integración de la biotecnología en el mejoramiento del maíz puede ser beneficiosa, pero puede generar preocupaciones sobre la seguridad y el impacto ambiental.

Entre las soluciones o estrategias está el uso de marcadores moleculares para acelerar el proceso de selección y mejorar la precisión. La selección asistida por marcadores facilita la selección de variedades con genes específicos asociados a la tolerancia al estrés. Además, la biotecnología permite la introducción de genes que otorgan esta tolerancia en variedades de maíz (Das et al., 2018). En zonas marginadas, el mejoramiento participativo permite involucrar a los agricultores en la selección y adaptación de variedades a las condiciones locales. Asimismo, pueden usarse modelos de simulación para predecir el comportamiento de las variedades en diferentes condiciones ambientales e identificar aquellas más tolerantes al estrés.

Manejo del cultivo y sus ventajas para disminuir el estrés biótico y abiótico

Entre las ventajas de una buena gestión del cultivo destaca el incremento del rendimiento. Un manejo adecuado del maíz, que incluya la elección de semilla de calidad, el control de malezas, una fertilización equilibrada y una correcta labor de labranza, puede aumentar la producción por hectárea y reducir los efectos del estrés biótico y abiótico en las plantas (Laffite, 2001). La resistencia a enfermedades y plagas con un manejo preventivo, por ejemplo, la rotación de cultivos y el monitoreo constante, ayudan a prevenir enfermedades, plagas y malezas que podrían afectar el rendimiento del maíz. El manejo eficiente del riego, el uso equilibrado de fertilizantes y la implementación de prácticas de conservación de suelos ayudan a optimizar el uso de recursos como el agua y los nutrientes, lo que favorece su conservación a largo plazo. Por otra parte, la aplicación de técnicas de manejo integrado de plagas y enfermedades reduce la necesidad de pesticidas, químicos costosos lo que reduce los costos de producción. Un manejo adecuado del maíz no solo maximiza la producción, sino que también fomenta la sostenibilidad agrícola, conservando la biodiversidad, manteniendo la salud del suelo y minimizando el impacto ambiental (Pretty et al., 2006). Además, garantiza la eficiencia de los

recursos, mejora la calidad del producto y contribuye a la conservación a largo plazo de los ecosistemas agrícolas.

Existen diversas instituciones como el INIFAP, que proporcionan paquetes tecnológicos para cada región con estrategias para disminuir el impacto de los diferentes tipos de estrés en las plantas (Tabla 4).

Tabla 4. Ejemplo de cómo se realiza el manejo de un cultivo, recomendado por el INIFAP

Concepto	Descripción
Características del área	Altitud 0-1200 msnm, temperatura media anual 23.5 °C y una precipitación media anual de 450-720 mm.
Preparación del terreno	Limpia, rotura, cruza, emparejamiento, bordeo y melgueo.
Variedades	H-437, H-439, V-440, H-443A, 30P49, Garañón, Criollo de Llera y Criollo de Hidalgo.
Tratamiento de semilla	Antes de la siembra se utilizó Semevín 350 FS en tratamiento a la semilla para la protección de plagas del suelo.
Siembra	A “tierra venida” en surcos de 0.81 cm de distancia; la semilla se deposita a una profundidad de aproximadamente 6 cm.
Fecha de siembra	12 de marzo en Llera y 22 de marzo en Hidalgo, año 2014.
Densidad de población*	Aproximadamente 55,350 plantas/hectárea a cosecha (18 a 20 kg/ha de semilla).
Riegos	Se sugieren cuatro riegos, uno de pre siembra de 15 cm de lámina, 15 a 20 días antes de la siembra y tres riegos de auxilio de 10 cm de lámina: el 1ro. a los 35 a 45 días después de nacidas las plantas o cuando estas tengan de 6 a 8 hojas completas; el 2do. a los 20 a 25 días después del primer riego de auxilio o en floración y el 3ro a los 15 a 20 días después del segundo de auxilio o en etapa de llenado de grano.
Fertilización*	Se aplicó lo recomendado por el NuMaSS de acuerdo con las necesidades y potencial productivo de cada terreno. Para obtener un promedio de 8.0 ton/ha, se utilizó la fórmula 180-60-00, combinando fertilizantes químicos (urea y MAP) y abonos orgánicos (gallinaza mejorada); durante la siembra la mitad de la urea, la gallinaza y el MAP y el resto de la urea antes del cierre del cultivo.
Cultivos (No.)	En ambas parcelas se realizaron tres cultivos, la tumba de bordos y dos escardas.

Concepto	Descripción
Control de maleza	Contra maleza de hoja ancha se aplica 1 kg/ha de Atrazina después de la última escarda y de uno a ocho días antes del 1er. riego de auxilio. Para controlar zacate (Johnson), aplicar 1.0 lt/ha de Sanson junto con la 2.0 lt/ha de atrazina para el control de maleza de hoja ancha, aplicados cuando el zacate Johnson tenía una altura de 15 a 20 cm.
Control de plagas	Contra gusano trozador y gallina ciega, se aplicó el Semevín a 3.0 lt por cada 100 kg de semilla; contra gusano cogollero se aplicaron 500 ml/ha de clorpirifos 480 + Dap Plus para mejorar el pH de los 200 lt de agua/ha.
Cosecha	Cuando el grano alcanzó aproximadamente el 20 % de humedad (julio o agosto).
Rendimiento esperado	8.0 (ton/ha).

Nota: datos no publicados

Fuente: INIFAP (2024).

Consideraciones finales

Las plantas de maíz han desarrollado respuestas fisiológicas y mecanismos de defensa para hacer frente a los diferentes tipos de estrés. Entre ellos, activan sistemas de defensa química, modifican su morfología y fisiología para conservar agua en caso de estrés por sequía, o ajustan su metabolismo para adaptarse a las condiciones cambiantes del clima o del suelo. Sin embargo, los procesos y mecanismos involucrados en la adaptación y resistencia de las plantas al estrés biótico y abiótico son complejos. Por ello, es importante desarrollar herramientas que permitan comprender estos procesos.

La investigación debe analizar cómo responde el maíz al estrés con el fin de diseñar estrategias de cultivo más resistentes y adaptadas a diferentes condiciones ambientales. Por su parte, los agricultores emplean diversas estrategias, como la selección de poblaciones resistentes a sequías, plagas y la competencia entre plantas. Además, el manejo eficiente del riego, una fertilización adecuada y el control de plagas pueden reducir el impacto de estos factores y promover un crecimiento óptimo del maíz dentro de sus sistemas de producción.

Referencias

- Andrade, F. H., Cirilo, A., Uhart, S. y Otegui, M. (1996). *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Editorial La Barrosa.
- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology* (5^a. ed.). Elsevier Academic Press.
- Aguilera, S., Rodríguez-Escobar, J. G., Romero-González, V. N., Osorio-Acosta, F., López-Romero, G. y Silva-Rosales, L. (2019). Identificación y abundancia de seis virus y un espiroplasma en infecciones simples y mixtas en campos de maíz en Veracruz, México. *Revista Bio Ciencias*, 6, e419. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.e419>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A. y Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Arcos, L. N. (2009). *Supervivencia de Fusarium oxysporum Schlechtend.: Fr.f.sp. lycopersici (Sacc.) W.C. Snyder & H.N. Hans. en materia orgánica en la Comarca Lagunera de Coahuila* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio UAAAN.
- Arvizu, J. L. (2011). Biocombustibles derivados del maíz. En C. De León y R. Rodríguez. (Coords.), *El cultivo del maíz, temas selectos* (pp. 31-37). Editorial Mundi-Prensa.
- Ashraf, M. y Akram, N. A. (2009). Improving salinity tolerance of plants through conventional breeding and genetic engineering: An analytical comparison. *Biotechnology Advances*, 27(6), 744-752.
- Avendaño-Arrazate, C. H., Molina-Galán, J. D., Trejo-López, C., López-Castañeda, C. y Cadena-Iñiguez, J. (2008). Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 19(1), 27-37.
- Badu-Apraku, B., Fakorede, M. A. B., Annor, B., Adu, G. B., Obeng-Bio, E., Abu, P. et al. (2023). Genetic enhancement of early and extra-early maturing maize for tolerance to low-soil nitrogen in Sub-Saharan Africa. *Crop Breeding, Genetics & Genomics*, 5(1), e230001.
- Badu-Apraku, B., Fakorede, M. A. B., Nelimor, C., Osuman, A. S., Bonkoungou, T. O., Muhideen, O. et al. (2023). Recent advances in breeding maize for drought, heat and combined heat and drought stress tolerance in Sub-Saharan Africa. *CABI Reviews*, (3), 1-32. <https://doi.org/10.1079/cabireviews.2023.0011>
- Blanco, C. A., Pellegaud, J. G., Nava-Camberos, U., Lugo-Barrera, D., Vega-Aquino, P., Coello, J. et al. (2014). Plagas del maíz en México y retos para la adopción de programas de manejo integrado de plagas. *Revista de Gestión Integrada de Plagas*, 5(4), E1-E9.
- Bohnert, H. J. y Sheveleva, E. (1998). Plant stress adaptations: Making metabolism move. *Current Opinion in Plant Biology*, 1(3), 267-274.

- Bolaños, J. y Edmeades, G. O. (1993). Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior. *Field Crops Research*, 31, 253-272.
- Boyer, J. S. y Westgate, M. E. (2004). Grain yields with limited water. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2385-2394.
- Cadena-Zamudio, D. A., Ruiz-Guerra, B., Guevara-Hernández, R. E., García-Franco, J. y Núñez-Farfán, J. (2018). Estudios de plasticidad fenotípica y herbivoría: Una revisión. *Agroproductividad*, 11(3), 133-140.
- Camacho-Escobar, M. A., Ramos-Ramos, D. A., Ávila-Serrano, N. Y., Sánchez-Bernal, E. I. y López-Garrido, S. J. (2020). Las defensas físico-químicas de las plantas y su efecto en la alimentación de los rumiantes. *Terra Latinoamericana*, 2, 443-453.
- Carvajal-Moreno, M. (2021). Mycotoxin challenges in maize production and possible control methods in the 21st century. *Journal of Cereal Science*, 103, 103293. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103293>
- Carvajal-Campos, P. y Jiménez, V. M. (2021). Ingeniería genética contra estrés abiótico en cultivos neotropicales: Osmolitos, factores de transcripción y CRISPR/Cas9. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 23(2), 47-66.
- Chaires-Grijalva, M. P., Serrano-Domínguez, A. K. y Coronado-Blanco, J. M. (2021). Ácaros asociados al maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 1497-1510. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2718>
- Corteva Agriscience. (2023). *P3057W. Ficha técnica del híbrido blanco P3057W para la Zona Tamaulipas*. [https://www.pioneer.com/content/dam/dpagco/pioneer/la/mx/es/files/Folleto%20Ci%C3%A9ncia%202022%20\(1\).pdf](https://www.pioneer.com/content/dam/dpagco/pioneer/la/mx/es/files/Folleto%20Ci%C3%A9ncia%202022%20(1).pdf)
- Das, K. O., Gezan, S. A., Guimarães, C. T., Nazarian, A., da Costa, L., Parentoni, S. N. et al. (2018). Improving accuracies of genomic predictions for drought tolerance in maize by joint modeling of additive and dominance effects in multi-environment trials. *Heredity (Edinb)*, 121(1), 24-37.
- Delgado, R. y Salas, A. M. (2006). Consideraciones para el desarrollo de un sistema integral de evaluación y manejo de la fertilidad del suelo y aplicación de fertilizantes para una agricultura sustentable en Venezuela. *Agronomía Tropical*, 56(3), 289-323.
- Díaz, M. F., León, G. de A., Carlos, D., Nava, C. y Mendoza, M. C. (2019). Inducción de resistencia a *Puccinia sorghi* y complejo mancha de asfalto (*Phyllachora maydis* y otros) en maíz (*Zea mays*). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37(1), 1-15.
- Fageria, N. K. y Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185.

- Félix-Gastélum, R., Lizárraga-Sánchez, G. J., Maldonado-Mendoza, I. E., Leyva-Madrigal, K. Y., Herrera-Rodríguez, G. y Espinoza-Matías, S. (2018). Confirmación de la identidad de *Exserohilum turcicum*, agente causal del tizón foliar del maíz en Sinaloa. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3), 468-478.
- Florido, B. M. y Bao, F. L. (2014). Tolerancia a estrés por déficit hídrico en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 70-88.
- García, M. D. (1998). *Estrés vegetal*. Universidad Nacional de Lomas de Zamora.
- García, O. N., Trejo, C. R., Pedroza, S. A., Gómez, L. F., Esparza, M. J. y Sepúlveda, B. M. (2005). Bases moleculares de la resistencia a sequía en plantas. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 2, 65-74.
- Goessens, T., Mouchtaris-Michailidis, T., Tesfamariam, K., Truong, N. N., Vertriest, F., Bader, Y. et al. (2024). Dietary mycotoxin exposure and human health risks: A protocol for a systematic review. *Environment International*, 184, 107389.
- Gómez-Padilla, E., Ruiz-Díez, B., Fajardo, S., Eichler-Loebermann, B., Samson, R., Van-Damme, P. et al. (2017). Caracterización de rizobios aislados de nódulos de frijol caupí, en suelos salinos de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 38(4), 39-49. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000400009&lng=es&tlng=es.
- González Torres, Y. (2007). Notas sobre el maíz entre los indígenas mesoamericanos antiguos y modernos. *Dimensión Antropológica*, 14(41), 45-80.
- Hall, A. J., Vilella, F., Trapani, N. y Chimenti, C. A. (1982). The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 5, 349-363.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L. y Beaton, J. D. (2023). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8ª. ed.). Pearson India Education Services.
- He, D. C., He, M. H., Amalin, D. M., Liu, W., Alvindia, D. G. y Zhan, J. (2021). Biological control of plant diseases: An evolutionary and Eco-economic consideration. *Pathogens*, 10(10), 1311.
- Hernández, L. A. y Carballo, C. A. (1984). Caracterización de genotipos de maíz de Valles Altos por sus requerimientos de unidades calor. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 44, 42-48.
- Ibarra, S. E., Castillo, G. A., Núñez, V. M., Suárez, R. R., Andrade, R. M. y Perdomo, R. F. (2020). Caracterización de la respuesta a la sequía de líneas segregantes de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1511-1524.
- INTAGRI. (2017). *Mecanismos químicos de defensa en las plantas. Serie Fitosanidad*, 86. <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/mecanismos-quimicos-de-defensa-en-las-plantas>

- Jasso-Miranda, M., Soria-Ruiz, J. y Antonio-Némiga, X. (2022). Pérdida de superficies cultivadas de maíz de temporal por efecto de heladas en el valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(2), 207-222.
- Jeuffroy, M. H. y Ney, B. (1997). Crop physiology and productivity. *Field Crops Research*, 53(1-3), 3-16.
- Johnson, D. A. y Hoy, J. W. (2006). Northern corn leaf blight: *Exserohilum turcicum*. En M. C. Shurtleff. (Ed.), *Compendium of Corn Diseases* (pp. 46-47). American Phytopathological Society.
- Lafitte, H.R. (2001). Mejoramiento para resistencia a los estreses abióticos. En R. L. Paliwal, H. R. Granados y A. D. Violic. (Eds.), *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción* (pp. 203-224). FAO.
- López, A. J. y Hernández, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459-496. <https://doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>
- Lozano, G. A. (2021). *Determinación del momento oportuno de cosecha de maíz (Zea mays L.) para la producción de semilla* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio Colposdigital.
- Madriz, K. (2002). Mecanismos de defensa en las interacciones planta-patógeno. *Manejo Integrado de Plagas*, 63, 22-32.
- Mansour, M. M., Salama, K. H., Ali, F. Z. y Abou Hadid, A. F. (2005). Cell and plant responses to NaCl in *Zea mays* L. cultivars differing in salt tolerance. *Genetic Applied Plant Physiology*, 31(1-2), 29-41.
- Matías, L. G., Luis, G. M. y García-Montalvo, I. A. (2016). Mecanismos de resistencia a patógenos e insectos herbívoros en teosinte y maíz. *Journal of Negative and No Positive Results*, 1(5), 190-198.
- Méndez-Espinoza, C. y Vallejo Reyna, M. Á. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales. *Revista Mexicana de Ciencias forestales*, 10(56), 33-64.
- Mishra, A. K. y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- NK Semillas. (s. f.). *N83N5. Potencial de rendimiento. Híbrido amarillo*. <https://www.nksemillas.com.mx/wp-content/uploads/catalogo/MX/N83N5-TAMAULIPAS.pdf>.
- NK Semillas. (s. f.). *NK925W. Potencial de rendimiento. Alto, peso específico, sanidad y calidad de grano*. <https://www.nksemillas.com.mx/wp-content/uploads/catalogo/MX/NK925W-TAMAULIPAS.pdf>.
- Owen, M. D. y Zelaya, I. A. (2005). Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides. *Pest Management Science*, 61(3), 301-311.

- Paul, S. y Roychoudhury, A. (2018). Transgenic plants for improved salinity and drought tolerance. En S. Singh y S. Hussain. (Eds.), *Biotechnologies of Crop Improvement. Volume 2* (pp. 141-181). Springer
- Pecina-Martínez, J. A., Mendoza-Castillo, M. C., López-Santillán, J. A., Castillo-González, F. y Mendoza-Rodríguez, M. (2009). Respuesta morfológica y fenológica de maíces nativos de Tamaulipas a ambientes contrastantes de México. *Agrociencia*, 43(7), 681-694.
- Peralta-Pérez, M. y Volke-Sepúlveda, T. L. (2012). La defensa antioxidante en las plantas: Una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 11(1), 75-88.
- Perotti, V. E., Larran, A. S., Palmieri, V. E., Martinatto, A. K. y Permingeat, H. R. (2020). Herbicide resistant weeds: A call to integrate conventional agricultural practices, molecular biology knowledge, and new technologies. *Plant Science*, 290, 110255. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110255>
- Porta, C. J., López-Acevedo, R. M. y Roquero De L., C. (1999). *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente* (2ª. ed.). Mundi-Prensa.
- Pretty, J. N., Noble, A. D., Bossio, D., Dixon, J., Hine, R. E., Penning de Vries, F. W. et al. (2006). Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1114-1119. <https://doi.org/10.1021/es051670d>
- Programa de Maíz del CIMMYT. (2004). *Enfermedades del maíz: una guía para su identificación en el campo* (4ª. ed.). CIMMYT.
- Ramírez G., M. y Rodríguez, A. (2012). Mecanismos de defensa y respuestas de las plantas en la interacción micorrízica: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 271-284.
- Reséndiz-Ramírez, Z., López-Santillán, J. A., Briones-Encinia, F., Mendoza-Castillo, M. D. C., y Varela-Fuentes, S. E. (2014). Situación actual de los sistemas de producción de grano de maíz en Tamaulipas, México. *Investigación y Ciencia*, 22(62), 69-75.
- Revilla, P., Malvar, R. A., Carrea, M. E. Butrón, A. y Ordás, A. (2000). Inheritance of cold tolerance at emergence and during early Season growth in maize. *Crop Science*, 40(6), 1579-1585. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4061579x>
- Reyes, C. A., Cantú, M. A. y Vázquez C. (2007). H-440, nuevo híbrido de maíz tolerante a sequía para el noreste de México. *Agricultura Técnica en México*, 33(2), 201-204. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172007000200011&lng=es&tlng=es.
- Reyes-Matamoros, J. M. y Martínez-Moreno, D. (2001). La plasticidad de las plantas. *Elementos: Ciencia y Cultura*, 8(41), 39-43.

- Ribaut, J. M. y Ragot, M. (2007). Marker-assisted selection to improve drought adaptation in maize: the backcross approach, perspectives, limitations, and alternatives. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 351-360. doi: 10.1093/jxb/erl214
- Rodríguez, A. M., Ortega, Y. y Kassem, M. (2023, 31 de julio). *Virus en plantas: Amenazas emergentes para la seguridad alimentaria y la economía agrícola*. Centro de Investigación en Química Aplicada. Gobierno de México. <https://ciqa.mx/VirusenPlantas.aspx>
- Rosales, E. y De la Garza, C. M. (2006). *Control químico de maleza en maíz en la zona central de Tamaulipas*. INIFAP-CIRNE.
- Sáez-Cigarruista, A., Morales-Guevara, D., Gordon-Mendoza, R., Jaén-Villarreal, J., Franco-Barrera, J. y Ramos-Manzané, F. (2024). Sensibilidad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) a diferentes períodos de déficit hídrico controlado. *Agronomía Mesoamericana*, 35(1), 1-13. <http://dx.doi.org/10.15517/am.2024.55660>.
- Sangoquiza, C. A., Viera, Y., Yáñez, C. F. y Zambrano, J. L. (2021). Efecto del estrés salino sobre el crecimiento de plántulas de maíz variedad “Tayuyo” en condiciones *in vitro*. *Centro Agrícola*, 48(2), 14-23. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852021000200014&lng=es&tlng=es.
- Setotaw, Y. B., Li, J., Qi, J., Ma, C., Zhang, M., Huang, C. et al. (2024). Salicylic acid positively regulates maize defenses against lepidopteran insects. *Plant Diversity*, 46(4), 519-529.
- Singh, P. M., Gilley, J. R. y Splinter, W. E. (1976). Temperature thresholds for corn growth in a controlled environment. *Transactions of the ASAE*, 19(6), 1152-1155.
- Taberner, A. (2013). La resistencia de las malas hierbas a los herbicidas en España. *PHYTOMA España: La Revista Profesional de Sanidad Vegetal*, 247, 26-30.
- Tartachnyk, I. y Blanke, M. M. (2002). Effect of mechanically-simulated hail on photosynthesis, dark respiration and transpiration of apple leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 48(2), 169-175.
- Tesfaye, K., Kruseman, G., Cairns, J. E., Zaman-Allah, M., Wegarya, D., Zaidi, P. H. et al. (2018). Potential benefits of drought and heat tolerance for adapting maize to climate change in tropical environments. *Climate Risk Management*, 19(2018), 106-119. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.10.001>
- Tiffin, P. y Moeller, D. A. (2006). Molecular evolution of plant immune system genes. *Trends in Genetics*, 22(12), 662-670. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2006.09.011>
- Venkateswarlu, B., Shanker, A. K., Shanker, C. y Maheswari, M. (2011). *Crop stress and its management: Perspectives and strategies*. Springer Science & Business Media.
- Vidal-Martínez, V. A., Herrera, F. B., Coutiño-Estrada, J. J., Sánchez-González, J., Ron-Parra, A., Ortega-Corona, A. et al. (2010). Identificación y localización de una especie de *Tripsacum* spp. en Nayarit, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 27-30.

- Wang, W., Vinocur, B. y Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), 1-14.
- Zhu, J., Hasegawa, P. M., Bressan, R. A. y Bohnert, H. J. (1997). Molecular aspects of osmotic stress in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 16(3), 253-277. <https://doi.org/10.1080/07352689709701950>
- Zúñiga, C. A. (2018). *Resistencia inducida a roya común (Puccinia sorghi Schwein) en maíz (Zea mays L.)* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio Colposdigital.

Capítulo 6

El maíz y sus derivados como fuente de antioxidantes

Verónica Hernández-Robledo¹

Ma. Guadalupe Bustos Vázquez¹

Anuar Valdilles-Segura¹

José Alfredo del Ángel del Ángel¹

Resumen

El maíz es un cereal básico en la alimentación en México por su valor nutricional. De sus componentes bioactivos sobresalen los antioxidantes, que previenen o retardan reacciones de oxidación en las células y neutralizan los radicales libres producidos en el organismo. Estos se pueden obtener de frutas, verduras, suplementos alimenticios, plantas medicinales y de diversos cereales, entre ellos el maíz (*Zea mays*). Los antioxidantes previenen enfermedades crónicas como diabetes, obesidad, enfermedades renales, cardiovasculares, neurológicas, entre otras. Estos beneficios se pueden obtener de diversos subproductos, como extractos de seda de maíz, espigas, cáscaras, mazorcas, granos de maíz, pelos de elote, salvado de maíz, entre otros.

Palabras clave: maíz, productos derivados, antioxidantes.

Abstract

Corn is a cereal considered the basis of nutrition in Mexico. It is well known that due to its nutritional value it makes an excellent contribution to the diet of consumers. Among the bioactive components that stand out from the composition of this grain are antioxidants, which have the function of preventing or delaying oxidation reactions in cells, and neutralizing free radicals produced in the body. In addition, antioxidants can be obtained from various sources such as fruits, vegetables, food supplements, medicinal plants and various cereals, among others. them corn (*Zea mays*).

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Blvd. E. Cárdenas González. No. 1201 Pte. Col. Jardín. C.P. 89840. Ciudad Mante, Tamaulipas, México. Contacto: vero.hernandez@docentes.uat.edu.mx

The beneficial effects of consuming antioxidants occur mainly in the prevention of chronic diseases such as diabetes and obesity, as well as kidney, cardiovascular, and neurological diseases, among others. These benefits can be obtained from various by-products and derivatives of corn that contain antioxidants, among which are extracts of corn silk, ears, husks, cobs, corn kernels, corn hairs, corn bran, among others.

Keywords: Corn, derived products, antioxidants

Antioxidantes: concepto y mecanismo de acción

Son sustancias químicas contenidas en alimentos o enzimas que se producen en el organismo. Estas se encargan de neutralizar, prevenir, eliminar o retardar reacciones de oxidación (transferencia de electrones de una sustancia a un agente oxidante) en las moléculas. Esta reacción ocurre cuando se genera óxido (combinación de un oxígeno más un metal o metaloide) existiendo pérdida de uno o más electrones y es iniciada por dos especies reactivas (radicales libres y pro-oxidantes = ROS). En tanto, los antioxidantes son capaces de remover o eliminar los ROS, neutralizando los radicales libres, estos últimos producen reacciones que dañan los componentes de las células. La Figura 1 muestra el comportamiento de los daños provocados por los radicales libres (Kasote et al., 2015; Shafras et al., 2024; Yashin et al., 2017).

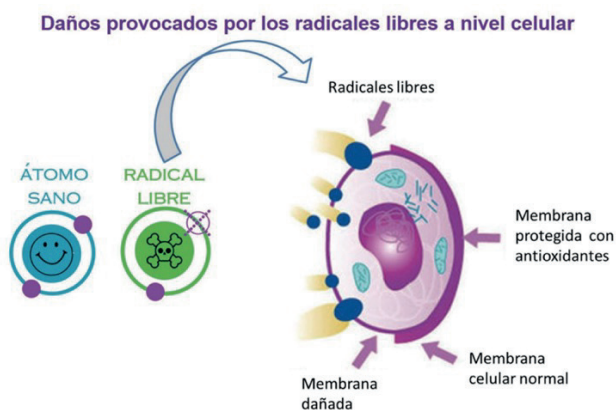


Figura 1. Mecanismo de acción de los antioxidantes

Fuente: *Saber Más. Revista de Divulgación*. https://www.sabermas.umich.mx/images/stories/40/art_3_3.JPG

Clasificación de antioxidantes

Para la clasificación de estos compuestos, se toman en cuenta características como actividad, propiedades, tamaño, naturaleza y solubilidad; además de actuar en el sistema alimentario como conservador de la calidad nutricional, la vida de anaquel y controlar algunas reacciones indeseables como la rancidez. Los antioxidantes también reducen el estrés oxidativo, eliminan radicales libres, y protegen al cuerpo de la degeneración oxidativa. La Tabla 1 presenta una clasificación de antioxidantes de acuerdo con la actividad, solubilidad, tamaño y naturaleza (Yashin et al., 2017; Flieger et al., 2021; Aziz et al., 2019).

Tabla 1. Clasificación de antioxidantes

Tipo	Subclasificación
Actividad	Enzimático
	No enzimático
Solubilidad	Solubles en agua
	Solubles en grasas
Por su tamaño	Moléculas grandes
	Moléculas pequeñas
Por su naturaleza	Antioxidantes minerales naturales
	Antioxidantes vitaminas
	Fitoquímicos
	Sintéticos

Fuente: Mohamed et al. (2024); Flieger et al. (2021); Aziz et al. (2019).

Fuentes de antioxidantes

Es necesario consumir alimentos que contengan antioxidantes. Estos compuestos bioactivos se pueden encontrar en frutas (uva, pera, plátano, guayaba, naranja, ciruela pasa, arándano, kiwi, mora azul, frutos rojos, granada, etcétera), ya que por sus propiedades eliminan radicales libres y promueven la salud (Olatunde et al., 2024). En la Tabla 2 se muestran los antioxidantes encontrados en algunos frutos.

Tabla 2. Fuentes naturales de antioxidantes

Fuentes	Antioxidantes	Referencia
Chirimoya africana (<i>Annona senegalensis</i> Pers), aguacate (<i>Persea americana</i>), papaya (<i>Carica papaya</i>), uchuva (<i>Physalis peruviana</i> L.), anón (<i>Annona squamosa</i> L.), guanábana (<i>Annona muricata</i> L.), fruto de rambután (<i>Nephelium lappaceum</i> L.), nuez marcadora (<i>Semecarpus anacardium</i> Linn.), palmito de california (<i>Washingtonia filifera</i>), guayaba (<i>Psidium guajava</i> L.).	Polifenoles (flavonoides, ácidos fenólicos, vitaminas como C y E, carotenoides).	Olatunde et al., 2024
Frutos de <i>Sorbus torminalis</i> (L.).		Karakousi et al., 2024
Frambuesa	Antocianinas, polifenoles y flavonoides.	Huang et al., 2023
Bebida kombucha a base de frutas de cereza, ciruela, fresa, albaricoque, uva y naranja.	Fenoles totales.	Morales, et al., 2023
Frutas exóticas colombianas uchuva (<i>Physalis peruviana</i> L.) y maracuyá morada (<i>Passiflora edulis</i> f. <i>Edulis</i> Sims).	Polifenoles y carotenoides.	Naranjo-Durán et al., 2023
Frutas de marula (<i>Sclerocarya birrea</i> subsp. <i>Caffra</i>).	Fenoles totales y flavonoides.	Nthabiseng et al., 2023
Frutos de acebuché.	Fenoles y flavonoides totales.	Ahmad et al., 2022

Fuente: elaboración propia.

Respecto a las verduras (espinacas, pimiento, jitomate, espárragos, brócoli, zanahoria, cebolla, entre otros), bebidas (té verde, té negro, vino tinto) y suplementos dietéticos (ricos en vitamina C y E), estos últimos usados bajo vigilancia y prescripción nutricional y médica. Otra fuente importante de antioxidantes son los cereales integrales o de grano entero, como el amaranto, cebada, centeno y el maíz, que es la base de la alimentación en México, y cuenta con muchas variedades. Además, puede ser procesado en diversas formas y es una alternativa para la prevención de la desnutrición en el ser humano (Herrera-Sotero et al., 2017).

Por último, las plantas medicinales (remedios herbolarios) también son utilizadas para el tratamiento, mejora y prevención de trastornos y enfermedades en humanos (Altaf et al., 2023).

Consumo de antioxidantes y su efecto en diversas patologías

Los antioxidantes son compuestos bioactivos encargados de reducir los efectos producidos por la oxidación de las células, prevenir el envejecimiento y anticiparse a la aparición de enfermedades crónicas. Al consumir antioxidantes es posible reducir el uso de fármacos con efectos adversos en el organismo. El consumo de productos naturales sería una alternativa para combatir enfermedades (Gutiérrez-Ramos et al., 2023; Guija-Guerra et al., 2023).

Fatima et al. (2022) encontraron que los antioxidantes derivados de la miel (flavonoides y polifenoles), el café (ácido clorogénico [CGA], cafestol, trigonelina), té (teanina y catequinas), vino tinto (resveratrol, ácidos fenólicos y polifenoles), hierbas y aceites (polifenoles) tienen un importante efecto antioxidante en enfermedades como trastornos neurodegenerativos y diabetes tipo 2. Las plantas comestibles también son portadoras de antioxidantes, entre ellos, el ácido gálico de tipo fenólico con efectos benéficos en enfermedades hepáticas, cardiovasculares, reproductivas, renales, neurológicas y pulmonares (Xiang et al., 2024). Ruíz-García et al. (2023) estudiaron el efecto del consumo del aceite de oliva extravirgen rico en antioxidantes fenólicos (oleocantal y oelaceína) en pacientes con obesidad y prediabetes, demostrando una reducción de niveles de glucosa y pérdida de peso, mejorando el efecto inflamatorio.

El grano de maíz (*Zea mays*) y sus derivados como fuentes de antioxidantes

El maíz (*Zea mays*) es un cereal que pertenece a la familia de las gramíneas. Estas plantas se caracterizan por tallos largos macizos, hojas, raíces, inflorescencias (masculinas y femeninas), de ella se desprenden los olotes conformados por granos de maíz (llamados carióspsides); varían en número y dimensión dependiendo de la especie (Castro-Acosta et al., 2021).

La composición química proximal repercute en la calidad nutricional del grano, estas características se ven influidas por diversos factores como el ambiente, la genética, el procesamiento, entre otros. El grano de maíz se compone de humedad (9.5-12.3 %), cenizas (1.2-2.9 %), proteínas (5.2-13.7 %), fibra cruda (0.8-2.9 %), carbohidratos (66-75.9 %), extracto etéreo (3.9-5.7 %) (Chan Chan et al., 2021).

Su uso es muy variado en el ámbito nutricional humano y animal, así como en la industria (productos derivados) (Garrido-Balam et al., 2023; Karmakar et al., 2021). Actualmente, alrededor del 5.6 % de maíz y subproductos derivados en el mundo son desperdiciados, por lo que es necesario aprovecharlo de forma integral, destacando su valor calórico debido a compuestos como proteínas y almidones. Además de componentes químicos y fitoquímicos (fitoesteroles, carotenoides, ácidos fenólicos, fitoesteroles, entre otros), los cuales forman parte de la nutrición alimentaria y las nuevas tendencias alimentarias en el mundo (Abbade, 2021a; Abbade, 2020b). Sus efectos antioxidantes neuroprotectores, anticancerígenos y anti diabéticos benefician la salud humana (García-Ortíz et al., 2024).

Entre los derivados o subproductos del maíz que destacan para la producción de antioxidantes, se encuentran los extractos de seda de maíz (como té o infusión para tratar obesidad, gota y edemas) que tienen alta actividad antioxidante debido a la presencia de fenoles totales y flavonoides (Sawangwong et al., 2024). Paulsmeyer et al. (2022) encontraron que los extractos de espigas, sedas, plántulas, vainas de hojas, cáscaras y glumas de mazorca contienen antocianinas en abundancia, que son antioxidantes responsables de dar coloraciones de tipo morado, azul y rojo. Los extractos con antocianinas provenientes del grano de maíz presentan una variedad de pigmentos que son de beneficio para la industria alimentaria. Díaz-García et al. (2021) obtuvieron un té a base de mazorca de maíz morado, con alta capacidad antioxidante y presencia de antocianinas naturales. Estos componentes regulan la presión arterial, poseen propiedades anticancerígenas y antimutagénicas.

En la industria alimentaria, se han utilizado granos de maíz morado para producir una bebida vegetal (leche) con alto contenido de antocianinas y antioxidantes, considerándose como una nueva alternativa en el mercado de las bebidas funcionales con un efecto benéfico en la salud de los consumidores (Shiekh et al., 2023). Aourabi et al. (2020) analizaron los extractos de los pelos de grano de elote, encontrando alta actividad antioxidante y presencia de polifenoles. Gon Chen et al. (2021) estudiaron la interacción de microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* y *Monascus anka*) con granos de maíz, demostrando que en conjunto producen la liberación de componentes fenólicos y capacidad antioxidante. Este proceso de fermentación muestra potencial para la obtención de antioxidantes a partir de cereales como el maíz. Akbari et al. (2023) utilizaron el salvado fermentado para la producción de componentes fenólicos totales con actividad antioxidante. Según Yu et al. (2023), de la harina de gluten de maíz se pueden obtener hidrolizados con actividad antioxidante. Menchaca-Armenta et al. (2023) estudiaron las propiedades antioxidantes en tortilla de maíz azul, encontrando la presencia de antocianinas, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante; por lo que puede considerarse un

alimento funcional, pues contiene agentes prebióticos que mejoran la función del intestino grueso. Boateng et al. (2023) analizaron un subproducto considerado de bajo valor: el pericarpio de maíz morado. De acuerdo con la literatura, tiene altas concentraciones de compuestos fenólicos, y se encontró alta actividad antioxidante y la presencia de antocianinas, flavonoides y ácidos fenólicos. Sharma et al. (2022) encontraron péptidos antioxidantes a partir de destilados de maíz que pueden utilizarse como aditivos e ingredientes en alimentos para humanos y animales. Otro subproducto es el estigma del maíz, de bajo costo, pero que presenta antioxidantes como polifenoles y flavonoides con efecto anticancerígeno y hepatoprotector; además de combatir la obesidad, diabetes y fatiga (Boeira et al., 2022).

Conclusión

El maíz es un cereal que se puede consumir de diversas formas, además, resalta por su valor nutritivo, económico, social y cultural. Se presenta en diversas variedades y puede ser cosechado en distintos lugares. Es fuente de antioxidantes con efectos beneficiosos sobre distintas patologías en la salud de los consumidores, lo que expande su uso y comercialización.

Referencias

- Abbade E. B. (2020b). Estimating the nutritional loss and the feeding potential derived from food losses worldwide. *World Development*, 134(12), 105038. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105038>.
- Abbade E. B. (2021a). Estimating the potential for nutrition and energy production derived from maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) losses in Brazil. *Waste management*, 134, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.009>
- Ahmad, N., Anwar, F., Zuo, Y., Aslam, F., Shahid, M., Abbas, A. et al. (2022). Wild olive fruits: phenolics profiling, antioxidants, antimicrobial, thrombolytic and haemolytic activities. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(12), 104241. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104241>
- Akbari, M., Razavi, S. H., Khodaiyan, F., Blesa, J. y Esteve, M. J. (2023). Fermented corn bran: A by-product with improved total phenolic content and antioxidant activity. *LWT*, 184, 115090. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2023.115090>
- Altaf, S., Abbas, R. Z., Akhtar, T., Siddique, F., Mahmood, M. S., Khan, M. K. et al. (2023). Plantas medicinales ricas en antioxidantes como candidatas potenciales para tratar la úlcera gástrica. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 22(5), 560-580. <https://doi.org/10.37360/blacpma.23.22.5.41>
- Aourabi, S., Driouch, M., Kadiri, M., Mahjoubi, F.Z., Sfaira, M., Hammouti, B. et al. (2020). Valorization of Zea mays hairs waste extracts for antioxidant and anticorrosive activity of mild steel in 1 M HCl environment. *Arabian Journal of Chemistry*, 13, 7183-7198. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.08.001>
- Aziz, M. H., Diab, A. S. y Mohammed, A. (2019). Antioxidant categories and mode of action. En E. Shalaby. (Ed.), *Antioxidants* (pp. 1-20). IntechOpen eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.83544>
- Boateng, I. D., Kumar, R., Daubert, C. R., Flint-Garcia, S., Mustapha, A., Kuehnelt, L. et al. (2023). Sonoprocessing improves phenolics profile, antioxidant capacity, structure, and product qualities of purple corn pericarp extract. *Ultrasonics Sonochemistry*, 95, 106418. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106418>
- Boeira, C. P., Flores, D. C., Alves, J. D., Moura, M. R., Melo, P. T., Rolim, C. M. et al. (2022). Effect of corn stigma extract on physical and antioxidant properties of biodegradable and edible gelatin and corn starch films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 208, 698-706. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.164>
- Castro-Acosta, M., Sánchez-Soto, B. H., Ruelas-Islas, J. R., Romero-Félix, C. S., Buelna-Tarín, S. y Almada-Ruíz, V. G. (2021). Morpho-physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) affected by drought during its vegetative stage. *Agro Productividad*, 14(8), 71-77. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i8.1960>

- Chan, M., Moguel Ordoñez, Y., Gallegos, S., Chel, L. y Betancur, D. (2021). Caracterización química y nutrimental de variedades de maíz (*Zea mays* L.) de alta calidad de proteína desarrolladas en Yucatán, México. *Biotechnia*, 23(2), 11-21. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i2.1334>
- Díaz-García, A., Salvá-Ruíz, B., Bautista-Cruz, N. y Condezo-Hoyos, L. (2021). Optimization of a natural low-calorie antioxidant tea prepared from purple corn (*Zea mays* L.) cobs and stevia (*Stevia rebaudiana* Bert.). *LWT*, 150(3), 111952. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111952>
- Fatima, M. T., Bhat, A. A., Nisar, S., Fakhro, K. A. y Al-Shabeeb Akil, A. S. (2022). The role of dietary antioxidants in type 2 diabetes and neurodegenerative disorders: An assessment of the benefit profile. *Heliyon*, 9(1), e12698. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12698>
- Flieger, J., Flieger, W., Baj, J. y Maciejewski, R. (2021). Antioxidants: Classification, Natural Sources, Activity/Capacity Measurements, and Usefulness for the Synthesis of Nanoparticles. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(15), 4135. <https://doi.org/10.3390/ma14154135>
- García-Ortiz, J. D., Flores-Gallegos, A. C., Espinoza-Velazquez, J., Ascacio-Valdés, J. A., Cobos-Puc, L. y Rodríguez-Herrera, R. (2024). Chapter 5 - Corn composition and its health benefits. En: M. L. Chávez, J. Buenrostro, D. Verma y C. N. Aguilar. (Eds.), *Enzymatic Processes for Food Valorization. Foundations and Frontiers of Biocatalysis Series* (pp. 71-83). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95996-4.00005-8>
- Garrido-Balam M., Chel-Guerrero L., Gallegos-Tintoré S., Castellanos-Ruelas A., Rodríguez-Canto W. y Betancur-Ancona D. (2023). Nutritional characterization of quality protein maize (QPM) (*Zea mays* L.) protein concentrates. *Food and Humanity*, 1, 1250-1255. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.09.022>
- Chen, G., Chen, B. y Song, D. (2021). Co-microbiological regulation of phenolic release through solid-state fermentation of corn kernels (*Zea mays* L.) to improve their antioxidant activity. *LWT- Food Science and Technology*, 142(7), 111003. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111003>
- Guija-Guerra, H. y Guija-Poma, E. (2023). Radicales libres y sistema antioxidante. *Horizonte Médico*, 23(2), e2158. <https://dx.doi.org/10.24265/horizmed.2023.v23n2.12>
- Gutiérrez-Ramos, M., Rodríguez-Saavedra, L., Alva-Plasencia, P., Abanto-Zamora, F., Chávez-Abanto, L. y Saavedra-Suárez, S. (2023). Nivel de conocimiento de antioxidantes y su relación con el estilo de vida. *Memorias del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Salud*, 21(1), e21122302. <https://doi.org/10.18004/mem.iics/1812-9528/2023.e21122302>

- Herrera-Sotero, M. Y., Cruz-Hernández, C. D., Trujillo-Carretero, C., Rodríguez-Dorantes, M., García-Galindo, H. S., Chávez-Servia, J. L. et al. (2017). Antioxidant and antiproliferative activity of blue corn and tortilla from native maize. *Chemistry Central Journal*, 11(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13065-017-0341-x>
- Huang, X., Wu, Y., Zhang, S., Yang, H., Wu, W., Lyu, L. et al. (2023). Changes in antioxidant substances and antioxidant enzyme activities in raspberry fruits at different developmental stages. *Scientia Horticulturae*, 321, 112314. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112314>
- Karakousi, C. V., Xanthippi, B., Theano, S. y Eugene, K. (2024). Análisis fitoquímico, actividad antioxidante e inhibidora de ALR2 de frutos de *Sorbus torminalis* (L.) en diferentes estados de madurez. *Fitoterapia*, 175, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105863>
- Karmakar, S., Billah, M., Hasan, M., Sohan, S. R., Hossain, M. F., Faisal Hoque, K. M. et al. (2021). Impact of LFGD (Ar+O₂) plasma on seed surface, germination, plant growth, productivity and nutritional composition of maize (*Zea mays* L.). *Heliyon*, 7(3), e06458. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06458>
- Kasote, D. M., Katyare, S. S., Hegde, M. V. y Bae, H. (2015). Significance of antioxidant potential of plants and its relevance to therapeutic applications. *International Journal of Biological Sciences*, 11(8), 982-991. <https://doi.org/10.7150/ijbs.12096>
- Menchaca-Armenta, M., Frutos, M., Ramírez-Wong, B., Valero-Cases, E., Muelas-Domingo, R., Quintero-Ramos, A. et al. (2023). Changes in phytochemical content, bioaccessibility and antioxidant capacity of corn tortillas during simulated in vitro gastrointestinal digestion. *Food Chemistry*, 405, 134223. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134223>
- Morales, D., Gutiérrez-Pensado, R., Bravo, F. I. y Muguerza, B. (2023). Novel kombucha beverages with antioxidant activity based on fruits as alternative substrates. *LWT*, 189, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115482>
- Naranjo-Durán, A. M., Quintero-Quiroz, J., Ciro-Gómez, G. L., Barona-Acevedo, M. J. y Contreras-Calderón, J. (2023). Characterization of the antioxidant activity, carotenoid profile by HPLC-MS of exotic colombian fruits (goldenberry and purple passion fruit) and optimization of antioxidant activity of this fruit blend. *Heliyon*, 9(7), e17819. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17819>
- Nthabiseng, L. K., Adeyanju, A. A. y Bamidele, O. P. (2023). Effects of frozen of marula fruits (*Sclerocarya birrea*) on chemical, antioxidant activities, and sensory properties of marula fruit juice. *Heliyon*, 9(10), e20452. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20452>

- Olatunde, A., Ogunro, O. B., Tijjani, H., Shariati, M. A., Mubarak, M. S. y Rengasamy, K. R. (2024). Chemical constituents and antioxidant potential of African Fruits. *South African Journal of Botany*, 166, 126-150. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.01.016>
- Paulsmeyer, M. N., Vermillion, K. E. y Juvik, J. A. (2022). Assessing the diversity of anthocyanin composition in various tissues of purple corn (*Zea mays* L.). *Phytochemistry*, 201, 113263. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113263>
- Ruiz-García, I., Ortíz-Flores, R., Badía, R., García-Borrego, A., García-Fernández, M., Lara, E. et al. (2023). Rich oleocanthal and oleacein extra virgin olive oil and inflammatory and antioxidant status in people with obesity and prediabetes. The APRIL study: A randomised, controlled crossover study. *Clinical Nutrition*, 42(8), 1389-1398. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2023.06.027>
- Sawangwong, W., Kiattisin, K., Somwongin, S., Wongrattanakamon, P., Chaiyana, W., Poomanee, W. y Sainakham, M. (2024). The assessment of composition, biological properties, safety and molecular docking of corn silk (*Zea mays* L.) extracts from the valorization of agricultural waste products in Thailand. *Industrial Crops and Products*, 212, 118352. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118352>
- Shafras, M., Sabaragamuwa, R. y Suwair, M. (2024). Role of dietary antioxidants in diabetes: An overview. *Food Chemistry Advances*, 4, 100666. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100666>
- Sharma, S., Pradhan, R., Manickavasagan, A., Thimmanagari, M., Saha, D., Singh, S. S. et al. (2022). Production of antioxidative protein hydrolysates from corn distillers solubles: Process optimization, antioxidant activity evaluation, and peptide analysis. *Industrial Crops and Products*, 184, 115107. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115107>
- Shiekh, K. A., Luanglaor, T., Hanprerakriengkrai, N., Jafari, S., Kijpatanasilp, I., Asadatorn, N. et al. (2023). Antioxidants and Quality Changes of Thermally Processed Purple Corn (*Zea mays* L.) Milk Fortified with Low Sucrose Content during Cold Storage. *Foods*, 12(2), 277. <https://doi.org/10.3390/foods12020277>
- Xiang, Z., Guan, H., Zhao, X., Xie, Q., Xie, Z., Cai, F. et al. (2024). Dietary gallic acid as an antioxidant: A review of its food industry applications, health benefits, bioavailability, nano-delivery systems, and drug interactions. *Food Research International*, 180, 114068. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114068>
- Yashin, A., Yashin, Y., Xia, X. y Nemzer, B. (2017). Antioxidant activity of spices and their impact on human health: A review. *Antioxidants*, 6(3), 70. <https://doi.org/10.3390/antiox6030070>
- Yu, X., Chen, Y., Qi, Z., Chen, Q., Cao, Y. y Kong, Q. (2023). Preparation and identification of a novel peptide with high antioxidant activity from corn gluten meal. *Food Chemistry*, 424, 136389. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136389>

Capítulo 7

El impacto de la biología molecular en maíz: implementación de nuevas técnicas

Francisco A. Paredes-Sánchez¹

Omar Gutiérrez-Terrazas²

Elsa V. Herrera-Mayorga¹

Resumen

La biología molecular ha impactado en la investigación básica del maíz, pues ha permitido conocer la estructura de su genoma y descubrir las bases genéticas de características económicamente importantes. En los más de 39 324 genes que posee, se han identificado mutaciones que revelan su historia evolutiva desde el teocintle hasta la actualidad, así como marcadores moleculares que pueden explicar su variación fenotípica en el rendimiento del grano y su tolerancia al estrés causado por factores bióticos y abióticos. La biología molecular, mediante técnicas angulares como la Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés: *Polymerase Chain Reaction*), aplicadas a la genética y genómica del maíz, ofrece herramientas para hacer frente a la creciente demanda mundial de granos, alimento animal, biocombustibles y materia prima industrial. Además, la PCR es un instrumento de monitoreo de la presencia de transgenes en razas autóctonas de maíz, lo que permite desarrollar estrategias para evitar la pérdida de biodiversidad genética.

Introducción a la biología molecular

La biología molecular es la rama de la ciencia encargada del estudio de la estructura y las propiedades de las biomoléculas (componentes básicos de las células de plantas y animales) como lípidos, carbohidratos, ácidos nucleicos (ácido desoxirribonucleico-ADN y ácido ribonucleico-ARN) y proteínas. Además, describe los mecanismos que dan origen a una proteína, a partir de los ácidos nucleicos, como la transcripción (copiado del ADN y transformado a ARN) y traducción (conversión del ARN a proteínas), así como su regulación (encendido/apagado) en los procesos biológicos como la respuesta a lesiones, infecciones, estrés o ausencia de comida (Vitale, 2017).

¹Docente-Investigador, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Universidad Autónoma de Tamaulipas, C.P. 89840, El Mante, Tamaulipas, México. Correo: faparedes@docentes.uat.edu.mx

²Estudiante, Ingeniero Agrónomo, Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Universidad Autónoma de Tamaulipas, C.P. 89840, El Mante, Tamaulipas, México.

La biología molecular realiza la descripción precisa de la estructura del ADN. Es la encargada de almacenar y transmitir la información necesaria para construir un ser vivo. Está formada por dos cadenas, complementarias y antiparalelas entre sí, y formadas por los nucleótidos denominados adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T), que se unen entre sí mediante dos o tres puentes de hidrógeno respectivamente ($A=T$, $G\equiv C$), para dar lugar así a la forma de doble hélice del ADN. El estudio del genoma (totalidad de ADN de un organismo) y de los genes de un organismo (regiones en el ADN capaz de llevar a la producción de una proteína o elemento funcional) ha sido uno de los campos más prominentes de esta rama de la ciencia, y ha permitido estudiar fenómenos biológicos a nivel molecular, tales como la herencia de características fenotípicas (aspectos medibles de un organismo) de generación en generación y la etiología de enfermedades o variación fenotípica de características económicamente importantes. Las mutaciones en el ADN pueden asociarse a ello, además de describir el mecanismo que conlleva la respuesta biológica a condiciones de estrés que involucra la expresión de genes (Allison, 2021).

La biología molecular implementa técnicas que combinan áreas como la biología, química, física y genética, y una de las angulares ha sido la PCR, desarrollada en 1984 por Kary Mullis. Esta es una técnica capaz de generar millones de copias *in vitro* de un fragmento de ADN deseado, utilizando un ciclo de temperatura para separar las cadenas del ADN (alrededor de 95 °C), oligonucleótidos para definir el inicio y el final del copiado, y una polimerasa (*Taq polimerasa*) para realizar la replicación del ADN a partir de un molde y nucleótidos proporcionados, como son la A, T, C y G (Green y Sambrook, 2019). La disponibilidad de millones de copias de ADN ha permitido conocer la secuencia de nucleótidos que conforman el genoma de un organismo y en elucidar la función biológica de cada región del ADN, identificando qué partes corresponden a genes (exones, intrones) y cuáles a regiones intergénicas. También es posible realizar análisis filogenéticos basados en ADN, es decir, estudiar la relación entre dos o más organismos a partir de la similitud de sus secuencias nucleotídicas. Además, se puede llevar a cabo el análisis funcional de genes, la detección de firmas genéticas (regiones de ADN conservadas a través del tiempo en un organismo), y la detección de mutaciones, como los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP), inserciones, deleciones y microsatélites, entre otras. Estas aplicaciones permiten, entre otras cosas, el diagnóstico de enfermedades mediante el análisis de mutaciones en el ADN, así como la detección genética de bacterias no cultivables, de lento crecimiento y de virus (Nagpa, 2020).

El maíz es el cultivo más producido a nivel mundial (1.1 billones de toneladas en 2020). Desde 1930, el incremento de la producción se ha logrado a través de la heterosis o vigor híbrido (un proceso con bases genéticas aún desconocidas) y

de la mejora de las prácticas agrícolas. Sin embargo, debido a la necesidad de mantener los altos rendimientos en la producción de maíz y hacer frente al cambio climático, la biología molecular se ha enfocado en la genética y genómica del maíz, el desarrollo biológico de la planta, elucidación de las bases genéticas de las características económicamente importantes y las bases genéticas de la tolerancia al estrés por factores bióticos y abióticos (Jackson et al., 2022).

Genoma del maíz

La aplicación de la biología molecular en el estudio del maíz permitió la elucidación de su genoma, el ensamble llamado B73 RefGen_v1 en su primera versión fue reportado en el 2009 y en los años subsiguientes fue actualizado, pasando a las versiones B73 RefGen_v2 para el 2010, B73 RefGen_v3 en el 2013 hasta la versión B73 RefGen_v4 en el 2016. Este avance se logró inicialmente a través de la metodología de BAC (*Bacterial Artificial Chromosomes*) y cósmidos (vectores de ADN) permitiendo mostrar que el genoma del maíz consta de 2.3 gigabases de los nucleótidos A, T, C, G y aproximadamente 39 324 genes identificados en su última versión (Jiao et al., 2017) que están organizados en 10 cromosomas (número haploide/mitad); compuesto de un 85 % de transposones (elementos móviles de ADN). La comparación genómica con otras especies de importancia económica como el arroz, sorgo y *Arabidopsis* sp. mostró que el maíz comparte 8 494 familias de genes, mostrando su estrecha relación. Esta secuencia de referencia del maíz llamada B73 permitió el avance en la investigación básica para facilitar los esfuerzos mundiales en hacer frente a la creciente necesidad de granos, alimento animal, biocombustibles y materia prima industrial (Schnable et al., 2009).

Domesticación del maíz

El maíz fue domesticado aproximadamente hace 10 000 años a partir del teocintle, un pasto silvestre de México y América Central. El estudio de su genoma ha llevado a detectar mutaciones en determinados genes, por ejemplo, en el *Teosinte glume architecture 1* (Tga1) que provocó la modificación de la estructura de la planta y el grano, además de cambios en otros genes que alteraron rasgos complejos, como el momento de floración.

Aunado a esto, la migración a través de las Américas y el movimiento de semillas hicieron que estas se seleccionaran y desarrollaran en nichos ecológicos específicos (razas autóctonas), floreciendo variedades con una enorme diversidad genética utilizadas para mejorar los cultivos (Sylvester et al., 2014).

Diversidad genética de variedades

El maíz posee una enorme diversidad genética (variabilidad en el ADN), un aspecto importante en los programas de mejoramiento para la obtención de nuevas variedades. Aunque inicialmente las razas autóctonas de maíz fueron populares, debido a su alta resistencia ante factores bióticos y abióticos, han sido reemplazadas por híbridos con mayor rendimiento. Para conocer su diversidad genética, se han identificado marcadores morfológicos, bioquímicos y moleculares. Sin embargo, los marcadores moleculares han mostrado menos deficiencias; inserciones, deleciones, translocaciones, duplicaciones y mutaciones puntuales del ADN, siendo identificadas mediante diversas técnicas de biología molecular (Tabla 1). La caracterización genética de germoplasmas ha permitido distinguir entre líneas de maíz e identificar marcadores moleculares que controlan la resistencia a enfermedades y características agronómicas. Molecularmente, es posible detectar fenotipos (características cuantificables) deseados y, mediante cruzamientos, superar deficiencias en una o más características (Kumar et al., 2022).

Tabla 1. Técnicas y marcadores moleculares empleados en el estudio de la diversidad genética del maíz

	Abreviación	Fundamento	Referencia
Técnicas	Fragmentos de restricción de longitud polimórfica	RFLP El ADN es digerido con endonucleasas de restricción, las cuales cortan el ADN en diferentes fragmentos dependiendo de las mutaciones presentes.	Zebire, 2020
	Amplificación aleatoria del ADN polimórfico	RAPD Consiste en la amplificación aleatoria de ADN genómico utilizando pequeños oligonucleótidos arbitrarios cuyos amplicones son separados en un gel de agarosa. Requieren menos ADN que la técnica de RFLP.	Balázová et al., 2016
	Polimorfismo en la longitud del fragmento amplificado	AFLP Consiste en digestión del ADN genómico mediante enzimas de restricción para posteriormente realizar una amplificación selectiva de un subconjunto de fragmentos unidos a adaptadores que serán separados mediante una electroforesis.	Roy et al., 2016

	Abreviación	Fundamento	Referencia
Mutaciones	Microsatélite	SSR Secuencias simples repetidas y en serie distribuidas a lo largo de todo el ADN. Nombre: phi002 Repetición: AACGAACGAACGAACG	Mathiang et al., 2022
	Polimorfismo de un solo nucleótido	SNP Variación en el genoma de un solo nucleótido, cuya abundancia debe de ser de al menos 1 % en la población estudiada. Nombre SNP Cromosoma: PZA00214_1 6 Posición Cambio: 91,704,092 (A/G)	Josia et al., 2021
	Inserción	InDe l Consisten en un conjunto corto de nucleótidos presentes/ausentes en un fragmento de ADN. Son marcadores menos abundantes que los SNPs. GAGCTGAGCTGAGCTGA GCAGGGCAACATGAGCT GAGCT----- GGG CAACAT	Wang et al., 2024
	Deleción		

Fuente: elaboración propia.

Mejoramiento genético: marcadores moleculares

Los marcadores moleculares son una herramienta útil en el mejoramiento de características complejas en el maíz, es decir, aquellas que no dependen de un solo gen, sino de un número aún desconocido de ellos. En este contexto, los loci de características cuantitativas (QTL, por sus siglas en inglés: *Quantitative Trait Loci*) junto con las mutaciones identificadas en genes asociados a características económicamente importantes o en regiones cercanas a estos genes, brindan la posibilidad de obtener variedades con características deseadas mediante la selección asistida por marcadores moleculares, teniendo ventajas sobre la selección fenotípica tradicional en los programas de cruzamiento, al no ser afectados por el ambiente (factores biótico o abiótico), edad o etapa de la planta y poseen una ventaja costo-beneficio (Gupta et al., 2022). La Tabla 2 muestra un ejemplo de los marcadores que se han identificado.

Tabla 2. Ejemplo de características agronómicas, marcadores y técnicas moleculares aplicadas en el maíz

	Marcador molecular/Técnica	Característica	Referencia
Estrés abiótico	RFLPs	Contenido de ácido abscísico (ABA) en hojas.	Tuberosa et al., 2007
	SSRs	Formación de raíces adventicias.	Mano et al., 2009
	SNPs	Tasa de emergencia, índice de germinación, longitud total, longitud de la raíz y longitud del brote.	Burton et al., 2014
Estrés biótico	SSRs	Tizón de la vaina (BLSB).	Garg et al., 2009
	RAPDs, SSRs	Resistencia a la pudrición del tallo.	Zhang et al., 2006
	SNPs	Mancha foliar (NCLB).	Garcia-Oliveira, et al., 2020
Características de calidad	SNPs	Contenido de almidón.	Zhou et al., 2012
	SNPs e InDels	Contenido de aceite.	Azmach et al., 2013
Características agronómicas	SSRs	Rendimiento de grano.	Xiao et al., 2005
	SNPs e InDels	Tiempo de floración.	Park et al., 2014
	SNPs	Tamaño del grano.	Yang et al., 2020

Fuente: modificado de Gupta et al. (2022).

Maíz genéticamente modificado y su monitoreo en México

La biología molecular ha permitido explorar el genoma y los genes de miles de seres vivos (plantas, animales, bacterias, virus), permitiendo la generación de organismos genéticamente modificados (OGM). El maíz genéticamente modificado (GM) contiene ADN exógeno (de *Bacillus thuringiensis*, *Agrobacterium tumefaciens*, virus del mosaico de la coliflor) introducido mediante técnicas de ingeniería genética como la electroporación, la biobalística o la transformación mediante *A. tumefaciens*. Estas modificaciones permiten expresar características nuevas, como la resistencia a herbicidas (glifosato, glufosinato de amonio) o a insectos plaga como los lepidópteros. (Nazir et al., 2019).

México, al ser centro de origen del maíz y contar con cerca de 59 razas autóctonas, enfrenta una preocupación legítima respecto a la posible pérdida de diversidad genética debido al cultivo de maíz GM. Por ello, en 1988 se estableció una moratoria para su cultivo. Posteriormente, en 2009 se otorgaron 15 permisos en varios estados para cultivos experimentales. En 2020 se promulgó la Ley Federal para el Fomento y Protección del Maíz Nativo, con el objetivo de revocar los permisos otorgados y, eventualmente, frenar el uso de maíz GM como alimento para humanos (Vásquez, 2023).

Actualmente, la biología molecular, a través de técnicas como PCR, RT-PCR (*Real Time PCR*), ha facilitado el análisis de razas autóctonas para detectar la presencia de transgenes. Entre ellos destacan el promotor 35S del virus del mosaico de la coliflor (CaMV) y el terminador de la nopalina sintasa (NOST) de *A. tumefaciens*. Estudios han reportado la presencia de transgenes en razas autóctonas en la sierra de Juárez, en Oaxaca (Quist y Chapela, 2001), así como en 15 estados de la República mexicana. Estos hallazgos incluyen tanto regiones donde se autorizó el cultivo experimental (norte de México), como zonas donde nunca se ha permitido (centro del país), encontrando dispersión de transgenes en diversas regiones (Ceniceros-Ojeda et al., 2023).

Conclusión

Las técnicas de la biología molecular aplicadas al estudio del genoma del maíz han contribuido significativamente al descubrimiento de su arquitectura genética. Además, han facilitado el mejoramiento genético, la conservación de su diversidad y el desarrollo de estrategias para enfrentar desafíos globales en alimentación y procesos industriales.

Referencias

- Allison, L. A. (2021). *Fundamental Molecular Biology*. Wiley.
- Azmach, G., Gedil, M., Menkir, A. y Spillane, C. (2013). Marker-trait association analysis of functional gene markers for provitamin A levels across diverse tropical yellow maize inbred lines. *BMC Plant Biology*, 13(227), 1-16. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-227>
- Balážová, Z., Vivodík, M. y Gálová, Z. (2016). Evaluation of molecular diversity of central European maize cultivars. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 28(2), 93-98. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2015.05.204>
- Burton, A. L., Johnson, J. M., Foerster, J. M., Hirsch, C. N., Buell, C. R., Hanlon, M. T. et al. (2014). QTL mapping and phenotypic variation for root architectural traits in maize (*Zea mays* L.). TAG. *Theoretical and applied genetics. Theoretische und Angewandte Genetik*, 127(11), 2293-2311. <https://doi.org/10.1007/s00122-014-2353-4>.
- Ceniceros-Ojeda, E. A., Hayano-Kanashiro, C., Martínez, O., Reyes-Valdés, M. H., Hernández-Godínez, F., Pons-Hernández, J. L. et al. (2023). Large scale sampling of Mexican maize landraces for the presence of transgenes. *Transgenic Research*, 32, 399-409. <https://doi.org/10.1007/s11248-023-00357-7>
- Garcia-Oliveira, A. L., Menkir, A., Kumar, P. L., Azuh, V., Jacob, O. O. y Gedil, M. (2020). Quantitative trait loci mapping for resistance to maize streak virus in F2:3 population of tropical maize. *Cereal Research Communications*, 48(2), 195-202. <https://doi.org/10.1007/s42976-020-00020-5>.
- Garg, A., Prasana, B. M., Sharma, R. C., Rathore, R. S., Saxena, S. C., Rao, H. S. et al. (2009). Genetic analysis and mapping of QTLs for resistance to banded leaf and sheath blight (*Rhizoctonia solani* f.sp. *sasakii*) in maize. En P. H. Zaidi, M. Azrai y K. V. Pixley. (Eds.), *Maize for Asia: emerging trends and technologies* (pp. 211-214). CIMMYT.
- Gupta, M., Kaur, Y., Kumar, H., Kumar, P., Choudhary, J., Kumar, P. et al. (2022). Molecular markers in maize improvement: A review. *Acta Scientific Agriculture*, 6(9), 55-70. <https://doi.org/10.31080/asag2022.06.1180>.
- Green, M. R. y Sambrook, J. (2019). *Polymerase Chain Reaction*. Cold Spring Harbor Protocols.
- Jackson, D., Tian, F. y Zhang, Z. (2022). Maize genetics, genomics, and sustainable improvement. *Mol Breeding*, 42(2), 1-3. <https://doi.org/10.1007/s11032-021-01266-5>.
- Josia, C., Mashingaidze, K., Amelework, A. B., Kondwakwenda, A., Musvosvi, C. y Sibiya, J. (2021). SNP-based assessment of genetic purity and diversity in maize hybrid breeding. *PLoS One*, 16(8), e0249505. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249505>
- Jiao, Y., Peluso, P., Shi, J., Liang, T., Stitzer, M. C., Wang, B. et al. (2017). Improved maize reference genome with single-molecule technologies. *Nature*, 546(7659), 524-527. <https://doi.org/10.1038/nature22971>

- Kumar, A., Longmei, N., Kumar, P. y Kaushik, P. (2022). Molecular Marker Analysis of Genetic Diversity in Maize: A Review. *OBM Genetics*, 6(1), 1-21. <https://doi.org/10.21926/obm.genet.2201150>.
- Mano, Y., Omori, F., Carlos, L. y Bird, R. (2009). QTL mapping of above-ground adventitious roots during flooding in maize $\times$ teosinte *Zea nicaraguensis* backcross population. *Plant Root*, 3, 3-9. <https://doi.org/10.3117/plantroot.3>.
- Mathiang, E. A., Sa, K. J., Park, H., Kim, Y. J. y Lee, J. K. (2022). Genetic Diversity and Population Structure of Normal Maize Germplasm Collected in South Sudan Revealed by SSR Markers. *Plants*, 11(20), 2787. <https://doi.org/10.3390/plants11202787>
- Nazir, S., Zaffar, M. y Rahman, S. (2019). Molecular Identification of Genetically Modified Crops for Biosafety and Legitimacy of Transgenes. En Y. C. Chen y S. J. Chenb. (Eds.), *Gene Editing. Technologies and applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81079>
- Nagpa, M. L. (2020). *Synthetic Biology: new interdisciplinary science*. IntechOpen.
- Park, K. J., Sa, K. J., Kim, B. W., Koh H. J. y Lee J. K. (2014). Genetic mapping and QTL analysis for yield and agronomic traits with an F2:3 population derived from a waxy corn $\times$ sweet corn cross. *Genes Genom*, 36(2), 179-189. <https://doi.org/10.1007/s13258-013-0157-6>
- Piñeyro-Nelson, A., Van Heerwaarden, J., Perales, H. R., Serratos-Hernández, J. A., Rangel, A., Hufford, M. B. et al. (2009). Transgenes in Mexican maize: molecular evidence and methodological considerations for GMO detection in landrace populations. *Molecular ecology*, 18(4), 750-761. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2008.03993.x>
- Quist, D. y Chapela, I. (2001). Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico. *Nature*, 414(6863), 541-543. doi: 10.1038/35107068
- Roy, N. S. y Kim, N. S. (2016). Genetic diversity analysis of maize lines using AFLP and TE-based molecular marker systems. *Genes & Genomics*, 38, 1005-1012. <https://doi.org/10.1007/s13258-016-0461-z>
- Schnable, P. S., Ware, D., Fulton, R. S., Stein, J. C., Wei, F., Pasternak, S. et al. (2009). The B73 maize genome: complexity, diversity, and dynamics. *Science*, 326(5956), 1112-1115. <https://doi.org/10.1126/science.1178534>.
- Sylvester, A., W., Schnable, P., S., Martienssen, R. (2014, octubre). *The Maize Genome*. Posters & Infographics. Science.
- Tuberosa, R., Salvi, S., Giuliani, S., Sanguineti, M. C., Bellotti, M., Conti, S. et al. (2007). Genome-wide approaches to investigate and improve maize response to drought. *CropScience*, 47(S3), S-120-S141. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0001IPBS>

- Vásquez, C. H. (2023). *Diseño de un esquema de bioseguridad comunitaria ante la presencia de maíz transgénico: estudio de caso en San Agustín Montelobos, Oaxaca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM.
- Vitale, I. (2017). *Molecular Biology: Reference Module in Life Sciences*. Elsevier.
- Xiao, Y. N., Li, X., George, M. L., Li, M., Zhang, S. y Zheng, Y. L. (2005). Quantitative trait locus analysis of drought tolerance and yield in Maize in China. *Plant Molecular Biology Reporter*, 23(2), 155-165. <https://doi.org/10.1007/BF02772706>.
- Yang, C. J., Russell, J., Ramsay, L., Thomas, W., Powell, W. y Mackay, I. (2020). *Overcoming barriers to the registration of new varieties*. Cold Spring Harbor Laboratory. <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.331892>.
- Wang, Z., Xia, A., Wang, Q., Cui, Z., Lu, M., Ye, Y. et al. (2024). Natural polymorphisms in ZMET2 encoding a DNA methyltransferase modulate the number of husk layers in maize. *Plant physiology*, 195(3), 2129-2142. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad113>
- Zebire, D. A. (2020). Applications of molecular markers in Genetic Diversity Studies of maize. *Nigerian Journal of Biotechnology*, 37(1), 101-108. <https://doi.org/10.4314/njb.v37i1.11>
- Zhang, Z. M., Zhao, M. J., Ding, H. P., Rong, T. Z. y Pan, G. T. (2006). Quantitative trait loci analysis of plant height and ear height in maize (*Zea mays* L.). *Russian Journal of Genetics*, 42, 306-310. <https://doi.org/10.1134/S1022795406030112>.
- Zhou, Y., Han, Y., Li, Z., Fu, Y., Fu, Z., Xu, S. et al. (2012). ZmcrtRB3 encodes a carotenoid hydroxylase that affects the accumulation of α -carotene in maize kernel. *Journal of Integrative Plant Biology*, 54(4), 260-269. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2012.01106.x>.

Capítulo 8

Desarrollo, uso y aplicación de nuevas tecnologías en el manejo integral del maíz

Ángel Mario Lerma-Sánchez¹

Kevin Daniel Mendoza-Hernández¹

Sergio Manuel Silva García¹

Introducción

La agricultura, base de numerosas economías en todo el mundo, ha experimentado transformaciones significativas a lo largo de los siglos. Los avances científicos y tecnológicos han sido clave para incrementar tanto la productividad como la sostenibilidad del sector. El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más cultivados del mundo. Su manejo ha evolucionado de forma continua, impulsado por el desarrollo y la aplicación de nuevas tecnologías. La gestión integrada del cultivo de maíz representa un campo dinámico que ha despertado un considerable interés en la investigación (Godfray et al., 2010).

La gestión integrada se refiere a un enfoque que combina diversas prácticas con el fin de manejar los cultivos de manera eficiente, optimizar los rendimientos y garantizar la sostenibilidad (Pretty, 2008). En el contexto del maíz, esto puede implicar la integración de la biotecnología, la agricultura de precisión, el control de plagas y enfermedades, la gestión de la salud del suelo y, más recientemente, las tecnologías digitales y basadas en datos.

La biotecnología ha tenido una profunda influencia en la gestión del maíz, especialmente mediante el desarrollo de variedades genéticamente modificadas (GM), con mayor resistencia a plagas y enfermedades, así como una mejor tolerancia al estrés abiótico (James, 2016). A pesar de los debates en torno a sus efectos ecológicos y sobre la salud, los cultivos GM se han convertido en una característica común en la agricultura moderna.

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Blvd. E. Cárdenas González. No. 1201 Pte. Col. Jardín. C.P. 89840. Ciudad Mante, Tamaulipas, México. Correo: amlerma@docentes.uat.edu.mx

El siglo XXI ha sido testigo del surgimiento de tecnologías de agricultura de precisión que han revolucionado la gestión de la producción de maíz. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG, por sus siglas en inglés), la teledetección y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) han sido fundamentales para manejar la variabilidad del campo, optimizar el uso de insumos y mejorar tanto el rendimiento como la rentabilidad (Whelan y Taylor, 2013).

Más recientemente, tecnologías digitales como el aprendizaje automático, la inteligencia artificial (IA) y la Internet de las Cosas (IoT) han mostrado un gran potencial para avanzar en la gestión integrada del maíz (Rose et al., 2016). Estas herramientas proporcionan a los agricultores sistemas avanzados de apoyo a la toma de decisiones, lo que podría inaugurar una nueva era de eficiencia, productividad y sostenibilidad.

A pesar de estos avances, la adopción de las tecnologías digitales y sus impactos en la producción del maíz han sido desiguales, y aún persisten varios desafíos. Por lo tanto, es crucial llevar a cabo una revisión sistemática y exhaustiva del desarrollo, uso y aplicación de ellas, con el objetivo de orientar mejor las políticas, prácticas y futuras líneas de investigación.

¿Qué son las nuevas tecnologías en el manejo integral del maíz?

La gestión integrada del maíz implica el uso de tecnologías emergentes para mejorar la eficiencia, productividad y sostenibilidad en el cultivo. Este enfoque holístico aprovecha los avances provenientes de la biotecnología, la agricultura de precisión y las tecnologías digitales basadas en datos, entre otras disciplinas. La biotecnología, por ejemplo, ha desarrollado variedades de maíz genéticamente modificado (GM), diseñadas para resistir plagas y enfermedades, así como para tolerar al estrés abiótico. Esto ha permitido mejorar el rendimiento y reducir pérdidas en la producción agrícola (Hongkun et al., 2020).

Las tecnologías de agricultura de precisión, como los Sistemas de Información Geográfica (GIS), la teledetección y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), han revolucionado la gestión del maíz. Estas herramientas han facilitado la recopilación y análisis de datos de campo, permitiendo implementar estrategias de manejo específicas para cada sistema productivo o agrosistema. Esto optimiza la aplicación de insumos y mejora el rendimiento y la rentabilidad (Chergui y Kechadi, 2022).

En la era digital, innovaciones como el aprendizaje automático, la IA y la IoT constituyen enfoques prometedores para la gestión integrada del maíz, ya que proporcionan herramientas sofisticadas de apoyo a la toma de decisiones, el monitoreo, al manejo en tiempo real de los cultivos y a la optimización de diversas operaciones agrícolas para aumentar la eficiencia y la productividad (Darwin et al., 2021). A pesar del potencial de estas tecnologías, su adopción e impacto han sido desiguales en diferentes regiones y sistemas agrícolas. Existen desafíos significativos relacionados con el acceso a la tecnología, la capacitación y la infraestructura necesaria. Por tanto, es crucial evaluar el desarrollo de estas innovaciones para informar políticas que superen estos obstáculos y extiendan los beneficios de manera amplia y equitativa.

Tecnologías innovadoras en el manejo integral del maíz

El manejo integral del maíz se ha transformado gracias a la adopción de nuevas tecnologías, que emplean herramientas de información para garantizar que los cultivos y el suelo reciban exactamente lo que necesitan, mejorando su salud y productividad. Estas innovaciones abarcan una amplia gama de herramientas y enfoques que permiten prácticas agrícolas más precisas y basadas en datos (Whelan y Taylor, 2013).

Entre las principales tecnologías aplicadas al cultivo de maíz se encuentran:

Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y GPS: estas herramientas permiten mapear la variabilidad del campo y aplicar insumos como agua y fertilizantes de manera precisa, optimizando recursos y mejorando el rendimiento y la rentabilidad (Chergui y Kechadi, 2022; Mulla, 2013). Sunil et al. (2022) destacan que la agricultura de precisión aumenta la eficiencia y reduce el impacto ambiental.

Drones y robótica: los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y los sistemas robóticos se utilizan para monitoreo de plagas, evaluación de la salud de los cultivos, siembra y cosecha automatizadas, mejorando la eficiencia operativa.

Aprendizaje automático e inteligencia artificial (IA): los algoritmos de IA se aplican para predecir rendimientos, detectar plagas y enfermedades; optimizar el uso de fertilizantes y riego (Rose et al., 2018).

Imágenes satelitales de alta resolución: facilitan el monitoreo a gran escala de la salud del cultivo, identificando áreas problemáticas, infestaciones de plagas o efectos climáticos en campos extensos.

Internet de las Cosas (IoT) y sensores inteligentes: estos dispositivos proporcionan datos en tiempo real sobre humedad del suelo, temperatura, pH y niveles de nutrientes, apoyando decisiones informadas en riego, fertilización y otras prácticas de gestión.

La integración de estas tecnologías en la gestión del maíz incrementa la productividad y promueve prácticas sostenibles, eficientes, sin desperdicios y con menor impacto ambiental.



Figura 1. Representación abstracta de algunas tecnologías de agricultura de precisión

Fuente: adaptado de Constanzo (s.f.).

Usos, aplicaciones, costos y beneficios

Las tecnologías de agricultura de precisión tienen una amplia gama de usos y aplicaciones en la gestión del cultivo del maíz. Los GIS, la teledetección y los GPS ayudan a los agricultores a mejorar la rentabilidad (Chergui y Kechadi, 2022). El costo de implementar estas tecnologías puede variar, a menudo, ser sustancial. La inversión inicial puede incluir la compra de equipos como receptores GPS, monitores de rendimiento, tecnología de tasa variable (VRT, por sus siglas en inglés) y el *software* para la gestión y el análisis de datos. Estos costos pueden oscilar entre unos pocos miles hasta varias decenas de miles de dólares. Además, existen costos continuos relacionados con el mantenimiento, las actualizaciones y, potencialmente, con tarifas de suscripción para ciertos servicios de *software* o datos (Shockley et al., 2011). Los beneficios de la agricultura de precisión son múltiples. Al permitir la aplicación precisa de insumos como fertilizantes y plaguicidas, estas tecnologías pueden generar ahorros significativos, mejorar los rendimientos y garantizar que cada parte del campo reciba la cantidad óptima de recursos. Esto contribuye a reducir la aplicación excesiva de insumos y a disminuir el impacto ambiental (Sunil et al., 2022).

Ventajas y Desventajas

La principal ventaja de la agricultura de precisión es su capacidad para aumentar la eficiencia y la productividad, optimizando el uso de insumos según las condiciones específicas del campo (Chergui y Kechadi, 2022). También puede ayudar a la sostenibilidad ambiental al reducir el uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas. Sin embargo, también hay varias desventajas. El costo inicial puede resultar prohibitivo para las pequeñas y medianas unidades de producción. Además, su uso efectivo requiere un alto nivel de conocimiento técnico. Otro aspecto que considerar son los posibles problemas relacionados con la propiedad y la privacidad de los datos. Especialmente relevante en los servicios basados en la nube, como el *software* o las bases de datos, donde los servidores y las conexiones a una red funcionan como un ecosistema interconectado. Los usuarios pueden acceder a estos servicios desde cualquier lugar y momento (Bronson y Knezevic, 2016).

Drones y robótica en la gestión integrada del maíz

En años recientes, los drones y la robótica han comenzado a desempeñar un papel esencial en la agricultura de precisión. El manejo integrado de plagas (MIP), parte del campo más amplio del manejo integrado, se beneficia de estas tecnologías.



Figura 2. Drones en la agricultura

Fuente: Galvin (2020).

Tecnología de drones

Los drones proporcionan a los agricultores una vista aérea de sus campos, permitiéndoles monitorear aspectos sobre la sanidad del cultivo, como presencia de plagas y enfermedades e incluso maleza, deficiencias nutrimentales, crecimiento y etapas vegetativas. Todo esto en tiempo real (Yang et al., 2017). Por ejemplo, un agricultor puede utilizar imágenes multispectrales para identificar áreas en donde las plantas estén estresadas debido a plagas o enfermedades. Equipados con cámaras térmicas, los drones también pueden detectar estrés hídrico entre los cultivos (Zarco-Tejada et al., 2012).

Tecnología robótica

Por otro lado, las tecnologías robóticas realizan tareas, como: siembra, eliminación de la maleza y cosecha. En la gestión del maíz, pueden reducir las necesidades de mano de obra humana y aumentar la eficiencia. Por ejemplo, los robots pueden automatizar el proceso de exploración de campos para la detección de plagas, una tarea que tradicionalmente realizan las personas (Santos Valle y Kienzle, 2020). Básicamente, pueden contribuir a mejorar la precisión, la salud general del cultivo y reducir el impacto de las plagas.

Usos y aplicaciones

Los drones y la robótica han despertado un interés considerable en el sector agrícola, especialmente en la gestión integrada del cultivo del maíz. Los drones proporcionan imágenes aéreas y permiten evaluar la sanidad de las plantas a través de diferentes análisis espectrales, identificar puntos críticos con presencia de plagas o enfermedades y supervisar las necesidades de riego. Por otro lado, los robots pueden realizar diversas tareas, incluyendo plantación, cosecha, eliminación de la maleza, e incluso aplicación de fertilizantes o plaguicidas con alta precisión (Zhang y Kovacs, 2012).

Costos

Los costos asociados con el uso de drones y sistemas robóticos pueden variar considerablemente. Para los drones, los costos pueden oscilar desde unos pocos cientos de dólares para modelos básicos hasta varios miles para modelos más avanzados, equipados con sensores y capacidades de imagen sofisticadas. Los sistemas robóticos pueden costar decenas de miles de dólares, dependiendo de su complejidad y de las funciones que desempeñen. A estos gastos se suman los costos de mantenimiento y operación, además de posibles tarifas por licencias y seguros (Mulla, 2013).

Beneficios

Los beneficios de los drones y la robótica son múltiples. Pueden reducir la mano de obra en operaciones a gran escala y aumentar la precisión en diversas tareas del proceso productivo. Los drones permiten obtener imágenes de alta resolución en poco tiempo, lo que posibilita una rápida respuesta ante problemas emergentes en el campo. A su vez, los robots pueden ejecutar tareas con alta precisión, lo que disminuye el desperdicio de insumos y mejora la gestión de los cultivos (Zhang y Kovacs, 2012).

Ventajas y desventajas

La principal ventaja de estas tecnologías es la posibilidad de ahorrar mano de obra y aumentar la eficiencia operativa. Permiten la recopilación de datos en tiempo real y de alta resolución, así como la ejecución precisa de tareas. La capacidad de los drones para monitorear el campo desde el aire ofrece una perspectiva que no se obtiene desde el suelo, lo que conduce a mejores decisiones en la gestión del cultivo (Hunt y Daughtry, 2017). Sin embargo, el alto costo inicial de los drones y de los sistemas robóticos puede ser un obstáculo para muchos agricultores, especialmente para las operaciones a pequeña escala. Además, su uso requiere un alto nivel de experiencia técnica para operarlas y para interpretar eficazmente los datos recabados. También pueden surgir preocupaciones relacionadas con la propiedad de los datos, la privacidad y el cumplimiento regulatorio, sobre todo con los drones (Bronson y Knezevic, 2016).

Imágenes satelitales en la gestión integrada del maíz

La imagen satelital ha revolucionado la agricultura. Esta tecnología implica el uso de sensores basados en satélites para capturar imágenes o datos sobre la superficie terrestre, que pueden ser utilizados para diversas aplicaciones agrícolas (Figura 3).

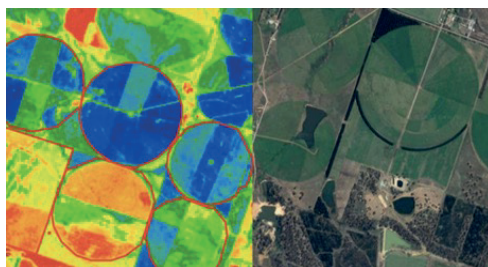


Figura 3. Imágenes satelitales en la agricultura

Fuente: s.a. (2020).

Tecnología y uso

La imagen satelital proporciona datos oportunos, objetivos y comparables a través de diferentes escalas geográficas, desde lo local hasta lo global (Torres-Sánchez et al., 2014). Esta tecnología permite la identificación y monitoreo de varios factores, incluyendo la salud de los cultivos, la humedad del suelo, los niveles de nutrientes y las infestaciones de plagas. Los agricultores pueden utilizar estos datos para tomar decisiones informadas sobre riego, fertilización, control de plagas y tiempos de cosecha.

Los satélites equipados con sensores multiespectrales o hiperespectrales pueden capturar datos a través de varios espectros de luz, lo que puede proporcionar detalles sobre la sanidad de las plantas y los factores estresantes, como enfermedades o plagas (Thenkabail et al., 2012). Esta capacidad es útil en la gestión del maíz, donde la detección temprana y el tratamiento de los factores estresantes pueden tener un impacto significativo en el rendimiento.

Beneficios y desafíos

Los beneficios del uso de la imagen satelital en la gestión integrada del maíz son significativos. Permite prácticas de gestión precisas y basadas en datos que pueden mejorar los rendimientos, reducir costos y mejorar la sostenibilidad ambiental (Lavender y Lavender, 2018). Sin embargo, también hay desafíos asociados con el uso de esta tecnología, como el acceso a datos satelitales, la interferencia de la cobertura de nubes con la calidad de la imagen y la necesidad de conocimientos especializados para interpretar y aplicar los datos (Hay, 2000). Además, la resolución de las imágenes satelitales puede no ser tan alta como la que ofrecen otras tecnologías de teledetección, como los drones.

Integración con otras tecnologías

La imagen satelital a menudo se integra con otras tecnologías, como los SIG, para un análisis más completo. Junto con el aprendizaje automático y el análisis de *big data*, estas tecnologías pueden proporcionar modelos predictivos avanzados para apoyar estrategias de gestión integrada para el maíz (Campos-Taberner et al., 2016).

Usos y aplicaciones

La imagen satelital, una parte de la tecnología de teledetección, ofrece una variedad de aplicaciones en el manejo integrado del maíz. Permite el monitoreo regular de la salud y el progreso de los cultivos a través de varios índices espectrales, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Los satélites pueden detectar estrés por sequía, deficiencias de nutrientes, infestaciones de plagas y enfermedades en etapas tempranas, permitiendo intervenciones oportunas (Bolton y Friedl, 2013). Además, las imágenes satelitales pueden ayudar en la predicción de rendimiento y las evaluaciones poscosecha.

Costos

Los costos asociados con el uso de imágenes satelitales varían dependiendo del tipo, la resolución y la frecuencia de captura de las imágenes. Las imágenes de alta resolución, adecuadas para un monitoreo detallado de los cultivos, pueden

resultar costosas. Además, con frecuencia requieren servicios de suscripción. Sin embargo, también existen varias fuentes gratuitas o de bajo costo disponibles, como las proporcionadas por el programa Landsat del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), o los satélites Sentinel de la Agencia Espacial Europea. A estos costos puede añadirse el del *software* necesario para procesar y analizar dichas imágenes (Mulla, 2013).

Beneficios

La imagen satelital proporciona información amplia, regular y objetiva sobre el estado de los cultivos. Esto facilita una toma de decisiones más informada y contribuye a mejorar su gestión. Además, permite la detección oportuna de problemas de salud de los cultivos, reduciendo la pérdida potencial debido a plagas, enfermedades o deficiencias de nutrientes (Bolton y Friedl, 2013).

Ventajas y desventajas

Una de las principales ventajas de la imagen satelital es su capacidad para cubrir grandes áreas de manera consistente, proporcionando una vista sinóptica del campo o incluso de toda la superficie de la unidad de producción. Esto permite a los agricultores detectar variaciones o problemas que pueden no ser visibles desde el suelo. La imagen satelital es no destructiva y puede monitorear cambios a lo largo del tiempo (Mulla, 2013). Sin embargo, también hay desventajas.

La resolución de las imágenes satelitales, especialmente las que están disponibles de forma gratuita, puede ser insuficiente para un monitoreo detallado de los cultivos. Las imágenes también pueden verse afectadas por la cobertura de nubes y no están disponibles a pedido, como pueden estarlo los drones. Además, la interpretación de las imágenes satelitales requiere experiencia técnica y *software* apropiado, lo cual puede ser una barrera para muchos agricultores (Bolton y Friedl, 2013).

Internet de las Cosas (IoT) y sensores en la gestión integrada del maíz

La IoT y los sensores están transformando la gestión de los cultivos y tienen aplicaciones significativas en la gestión integrada del maíz (Figura 4).



Figura 4. Sensores de IoT en la agricultura

Fuente: adaptado de Quy et al. (2022).

Tecnología IoT

La tecnología IoT en agricultura implica una red de dispositivos interconectados incrustados con sensores y *hardware* de comunicación. Estos dispositivos recopilan, envían y reciben datos, facilitando el monitoreo y la toma de decisiones en tiempo real (Wolfert et al., 2017). En la gestión del maíz, los dispositivos IoT podrían monitorear la humedad del suelo, la temperatura, la intensidad de la luz y los niveles de nutrientes, proporcionando valiosas percepciones sobre la salud y el crecimiento del cultivo (Farooq et al., 2019).

Tecnología de sensores

Los sensores desempeñan un papel crítico en este proceso. Los sensores de suelo pueden monitorear la humedad y los niveles de nutrientes, lo que contribuye a optimizar la irrigación y la fertilización. Los sensores climáticos recopilan datos sobre la temperatura, la humedad y la intensidad lumínica, ofreciendo datos sobre las condiciones de crecimiento. Otros dispositivos pueden estar diseñados para detectar plagas o enfermedades específicas que podrían afectar los cultivos de maíz (Pierce y Elliott, 2008).

En el contexto más amplio de la gestión integrada del maíz, estas tecnologías permiten las prácticas de agricultura de precisión al proporcionar información precisa y en tiempo real sobre varios parámetros del cultivo y del entorno. Estos datos ayudan a los agricultores a tomar decisiones informadas respecto a la irrigación, la fertilización, el manejo de plagas y otras prácticas que, en última instancia, mejoran la sanidad de los cultivos, aumentan los rendimientos y favorecen la eficiencia de los recursos (Wang et al., 2006).

Usos y aplicaciones

La IoT y los sensores tienen aplicaciones transformadoras en la gestión integrada del maíz. Esta tecnología permite medir varios parámetros, como la humedad del suelo, la temperatura, el pH, los niveles de nutrientes e incluso la presencia de plagas o enfermedades. La información recopilada puede transmitirse en tiempo real a los agricultores a través de dispositivos IoT, facilitando una toma de decisiones rápida. Además, estos pueden controlar sistemas de riego, equipos de fertilización y otras maquinarias, permitiendo una gestión de cultivos automatizada y precisa (Ray, 2017).

Costos

El costo de implementar tecnologías basadas en IoT y sensores varía considerablemente según la escala y complejidad del sistema. Los sensores básicos de humedad o temperatura pueden costar solo unos pocos dólares cada uno, mientras que los sensores más sofisticados, como los de detección de nutrientes, pueden alcanzar cientos de dólares por unidad. A estos se suman los dispositivos IoT necesarios para la transmisión de datos y la infraestructura requerida para su funcionamiento. También hay que considerar el *software* de gestión y análisis, así como los costos de instalación, mantenimiento y posibles tarifas de suscripción para ciertos servicios (Wolfert et al., 2017).

Beneficios

Los beneficios de la IoT y los sensores en la gestión del maíz son significativos. Permiten el monitoreo en tiempo real y preciso de las condiciones del cultivo, lo que facilita un uso más eficiente de insumos como el agua y los fertilizantes. Esto se traduce en ahorro de costos y mejora del rendimiento. Además, estas tecnologías generan una gran cantidad de información útil sobre el estado del campo: humedad, temperatura del suelo, niveles de nutrientes, crecimiento de las plantas y presencia de plagas o enfermedades. Este abundante flujo de información permite a los agricultores obtener una comprensión más profunda y detallada de sus

cultivos. Al analizar los datos, pueden identificar patrones y tendencias que antes pasaban desapercibidos, lo que facilita la predicción de problemas potenciales y la implementación de soluciones preventivas. Esto les permite tomar decisiones de gestión basadas en evidencia, ajustar los programas de riego y fertilización, aplicar medidas de control de plagas de manera oportuna y optimizar las prácticas de siembra. En conjunto, el uso eficiente de estos datos mejora la productividad, reduce los costos operativos y promueve una agricultura más sostenible (Ray, 2017).

Ventajas y desventajas

La principal ventaja de la IoT y los sensores es su capacidad de monitorear y gestionar las condiciones del cultivo con alta precisión en tiempo real. Esto contribuye a mejorar la productividad, la sostenibilidad y la automatización en las operaciones agrícolas, reduciendo los requerimientos de mano de obra (Wolfert et al., 2017). Sin embargo, el costo inicial de configuración puede ser alto para las granjas de pequeña escala. Además, estas tecnologías requieren una conexión a Internet estable, lo que puede representar un desafío en las zonas rurales. También puede haber problemas relacionados con la seguridad y privacidad de los datos. Por último, la operación e interpretación de los datos de estos sistemas requieren un cierto nivel de experiencia técnica (Kamilaris et al., 2017).

Conclusiones

El presente capítulo demuestra que la gestión integrada del maíz ha entrado en una fase de profunda transformación impulsada por la convergencia de biotecnología, agricultura de precisión, plataformas digitales e Internet de las Cosas. En conjunto, estas innovaciones elevan la productividad y la rentabilidad al tiempo que reducen insumos y mitigan impactos ambientales, situando al maíz como un modelo de agricultura inteligente y sostenible.

Los hallazgos más relevantes pueden sintetizarse en cuatro ejes: 1) Intensificación basada en datos, que se traduce en aumentos de rendimiento y en una notable reducción de costos e impactos ecológicos. 2) Automatización de operaciones críticas, que disminuye la dependencia de mano de obra estacional y mejora la oportunidad de las intervenciones agrícolas. 3) Sinergia de tecnologías emergentes, que maximiza la resiliencia del cultivo ante plagas, enfermedades y variabilidad climática. 4) Brechas de adopción y gobernanza, que subrayan la urgencia de políticas públicas orientadas a financiamiento accesible, infraestructura digital rural y programas de formación especializados. En definitiva, las nuevas tecnologías configuran un paradigma agrícola que convierte la información en insumo estratégico y confiere al productor capacidades predictivas. Sin embargo, capitalizar plenamente estos avances exige estrategias de escalamiento inclusivas, marcos regulatorios claros y alianzas entre sector público, académico y privado que garanticen la sostenibilidad.

Referencias

- Bolton, D. K. y Friedl, M. A. (2013). Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.007>
- Bronson, K. F. y Knezevic, I. (2016). Big Data in food and agriculture. *Big Data & Society*, 3(1), 1-5. <https://doi.org/10.1177/2053951716648174>
- Campos-Taberner, M., Garcia-Haro, F. J., Confalonieri, R., Martinez, B., Moreno, A., Sanchez-Ruiz, S. et al. (2016). Multi-temporal monitoring of plant area index in the Valencia rice district with PocketLAI. *Remote Sensing*, 9(3), 237. <https://doi.org/10.3390/rs8030202>
- Chergui, N. y Kechadi, M. (2022). Data analytics for crop management: a big data view. *Journal of Big Data*, 9(1), 1-37. <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00668-2>
- Constanzo, M. (s.f.). *Technologies of precision farming*. Wikifarmer Library. <https://wikifarmer.com/what-are-the-main-technologies-and-applications-of-precision-agriculture/>
- Darwin, B., Dharmaraj, P., Prince, S., Popescu, D. E. y Hemanth, D. J. (2021). Recognition of Bloom/Yield in Crop Images Using Deep Learning Models for Smart Agriculture: A Review. *Agronomy*, 11(4), 646. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11040646>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K. y Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7(1), 156237-156271. doi:10.1109/access.2019.2949703
- Galvin, M. (2020). *Precision Agriculture: the Future of Farming* Cubic3. <https://www.cubicletelecom.com/blog/precision-agriculture-the-future-of-farming/>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F. et al. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Hay, S. I. (2000). An overview of remote sensing and geodesy for epidemiology and public health application. *Advances in Parasitology*, 47, 1-35. [https://doi.org/10.1016/S0065-308X\(00\)47005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-308X(00)47005-3)
- Hongkun, T., Tianhai, W., Yadong, L., Xi, Q. y Yanzhou, L. (2020). Computer vision technology in agricultural automation —A review. *Information Processing in Agriculture*, 7(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006>
- Hunt, E. R. y Daughtry, C. S. T. (2017). What good are unmanned aircraft systems for agricultural remote sensing and precision agriculture? *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 5345-5376. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>
- James, C. (2016). *Brief 52: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops*. ISAAA Inc. <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/52/>

- Kamilaris, A., Kartakoullis, A. y Prenafeta-Boldó, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143(2), 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
- Lavender, S. y Lavender, S. (2018). *Practical handbook of remote sensing*. CRC Press.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- s.a. (2023). *Satellite Big Data: How It Is Changing the Face of Precision Farming* (C. Solutions, Ed.) [Review of Satellite Big Data: How It Is Changing the Face of Precision Farming]. <https://www.farmmanagement.pro/satellite-big-data-how-it-is-changing-the-face-of-precision-farming/>
- Pierce, F. y Elliott, T. (2008). Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.007>
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>
- Quy, V. K., Hau, N. V., Anh, D. V., Quy, N. M., Ban, N. T., Lanza, S. et al. (2022). IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges. *Applied Sciences*, 12(7), 3396. <https://doi.org/10.3390/app12073396>
- Ray, P. P. (2017). Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(4), 395-420. <https://doi.org/10.3233/AIS-170440>
- Rose, D. C., Sutherland, W. J., Parker, C., Lobley, M., Winter, M., Morris, C. et al. (2016). Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems*, 149, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.009>
- Santos Valle, S. y Kienzle, J. (2020). *Agriculture 4.0 - Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/14fc8bf7-fdeb-4c7c-a2ed-b2d59118a70b/content>
- Shockley, J. M., Dillon, C. R. y Stombaugh, T. S. (2011). A Whole Farm Analysis of the Influence of Auto-Steer Navigation on Net Returns, Risk, and Production Practices. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 43(1), 57-75. doi:10.1017/S1074070800004053
- Sunil, G. C., Zhang, Y., Koparan, C., Ahmed, M. R., Howatt, K. y Sun, X. (2022). Weed and crop species classification using computer vision and deep learning technologies in greenhouse conditions. *Journal of Agriculture and Food Research*, 9, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100325>

- Thenkabail, P. S., Lyon, J. G. y Huete, A. (2012). Advances in hyperspectral remote sensing of vegetation and agricultural crops. En P. Thenkabail, J. Lyon y A. Huete. (Ed.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation* (pp. 3-36). CRC Press. <https://pubs.usgs.gov/publication/70098951>
- Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., de Castro, A. I. y López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>
- Wang, N., Zhang, N. y Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry. Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>
- Whelan, B. y Taylor, J. (2013). *Precision Agriculture for Grain Production Systems*. CSIRO Publishing. <https://www.publish.csiro.au/book/6959/>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C. y Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in smart farming. A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H. et al. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: Current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1111. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V. y Berni, J. A. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
- Zhang, C. y Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>

Capítulo 9

Cinco plagas que atacan el cultivo de maíz (*Zea mays*) en México

Saúl Pardo-Melgarejo¹

Ulises Santiago-López²

Alejandra Mondragón-Flores¹

Norma Zamora-Avilés³

Norma Santiago-López⁴

El maíz [*Zea mays* L. (Poaceae)], es el tercer cultivo más importante a nivel mundial, con 82 millones de hectáreas plantadas y con un crecimiento exponencial en demanda (Mera et al., 2021). México es uno de los principales productores y consumidores de este grano, con una superficie designada del 6 % y una producción de 7 308 269.80 hectáreas (SIAP, 2024). En México, este cultivo se utiliza para la producción de grano y forraje verde, para consumo humano y para alimento de ganado, respectivamente. Los principales estados productores de maíz son: Michoacán, Jalisco, Tamaulipas y Sinaloa (SIAP, 2024), con grandes extensiones territoriales para su siembra y un considerable impacto en el uso de suelo. Este tipo de actividades agrícolas influye directamente en el desequilibrio ecológico, especialmente en la alteración de la diversidad y dinámica poblacional de la entomofauna benéfica nativa (depredadores o parasitoides), la cual ayuda de forma natural a mantener bajo control a insectos plaga (Quispe, 2015; Araiza, 2018).

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Campo Experimental Valle de Apatzingán. Km. 17.5 Carr. Apatzingán-Cuatro Caminos, 60781, Antúnez, Michoacán, México. Correo: pardo.saul@inifap.gob.mx

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. Melchor Ocampo # 7, Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etla, C.P. 68200, Oaxaca.

³ Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Carretera Antiguo Aeropuerto Km 2.5, C.P. 30700, Tapachula, Chiapas-México.

⁴ Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México Texcoco km 36.5, Montecillos, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230

Otro problema de las zonas donde se produce este cultivo es el incremento de plagas asociadas. Es decir, insectos que no eran considerados plaga del cultivo de maíz y otras gramíneas. Hoy en día son un problema fitosanitario recurrente y en algunos casos, alarmante (SIAP, 2024).

Por lo tanto, cultivar maíz en grandes extensiones territoriales en México, aumenta la probabilidad de que diversas especies de insectos plaga lo utilicen como alimento, lo que genera afectaciones al crecimiento de la planta y, por ende, una disminución en la producción (Hernández-Trejo et al., 2018).

Las principales plagas del cultivo de maíz en México son: gusano cortador negro *Agrotis ipsilon* Hufnagel (Hernández-Trejo et al., 2019), la mosca de los estigmas del maíz, *Euxesta stigmatis* Loew, *Chaetopsis massyla* Walker, *Eumecosomyia nubila* Walker (Camacho-Baéz et al., 2012), gusano soldado *Spodoptera exigua* Hubner, (Hernández-Trejo et al., 2019), y gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* Walker (Ávila-Martínez et al., 2023), barrenador del tallo *Diatraea grandiosella* Dyar (Ramos-Martínez, 2023), gusano elotero *Helicoverpa Zea* Boddie (González-Maldonado et al., 2023), langosta centroamericana *Schistocera piceifrons* Walker (Servín y Mendoza, 2022) y chapulín de la milpa *Sphenarium purpurascens* Charpentier (Cruz, 2022); las últimas cinco mencionadas, son las de mayor importancia en México.

El capítulo describe y analiza factores que favorecen el desarrollo de estas plagas (Fernández et al., 2002; Ortiz, 2022). Además, se destaca la importancia que tiene el monitoreo regular de insectos plaga para mejorar el rendimiento de este cultivo (Varón de Agudelo et al., 2022). Se muestra también el análisis sobre los aspectos biológicos (ciclos de vida, fertilidad, fecundidad, etcétera), ecológicos (capacidad de dispersión, adaptación a zonas geográficas), cambios fisiológicos (generación de resistencia a insecticidas químicos) de las plagas mencionadas (Saldamando, 2016). Finalmente, se analiza el manejo integrado de las principales plagas en maíz, abordando métodos de control biológico, mecánico, cultural, etológico y legal. Estas estrategias son amigables con el ambiente, los organismos vivos y la salud humana (Zelaya-Molina et al., 2022). Esto con la finalidad de mejorar la sanidad y productividad del cultivo, garantizando cosechas saludables que contribuyan a la sostenibilidad ambiental de la producción agrícola del maíz.

Pérdidas económicas en cultivo de maíz

A continuación, se presenta el listado de las cinco plagas que ocasionan daños con mayor frecuencia en México:

1. *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae)

Tabla 1. Clasificación taxonómica

Phylum: Arthropoda
Clase: Insecta
Orden: Lepidoptera
Familia: Noctuidae
Género: <i>Spodoptera</i>
Especie: <i>Spodoptera frugiperda</i>
Nombre común: Gusano cogollero

SENASICA (2021b).

Distribución: esta especie es originaria del continente americano y se encuentra en más de 40 países, incluyendo las zonas tropicales y subtropicales de Norteamérica, como México y Estados Unidos (SENASICA, 2021b), posteriormente se propagó hacia el sur. En 2018, comenzó su dispersión a otros continentes, como África, Asia y Oceanía, incluyendo Australia (Fan et al., 2020) (Figura 1). En México, se encuentra prácticamente en todos los sitios agrícolas, con poblaciones más pronunciadas en las zonas tropicales y subtropicales, donde esta plaga puede crecer en diversas especies de gramíneas como hospedantes alternos.

Morfología y ciclo biológico: al ser un insecto de metamorfosis completa, su ciclo reproductivo se conforma de un huevo, larva y adulto. Sus huevos son de forma esférica, blanquecinos, estriados, de 0.4 mm de diámetro. Cuando son recién puestos tienen una tonalidad verde, y previo a la eclosión son de color pardo claro. La característica morfológica evidente de la larva son 4 pináculos dorsales en forma de cuadrado en el segmento abdominal VIII. También cuenta con pináculos en el resto de los segmentos, pero estos son de forma trapezoidal. En el área frontal de su cabeza cuenta con una Y invertida (Figura 2). En el caso de los adultos, el área costal es de una tonalidad pálida, y en forma de triángulo (Tejeda-Reyes et al., 2023; SENASICA, 2021b).

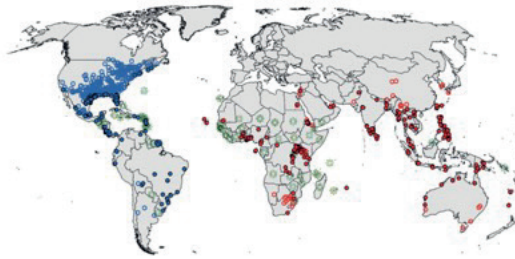


Figura 1. Distribución mundial de *Spodoptera frugiperda*

Nota: población categorizada como efímera (círculos azules o rojos sin rellenar), establecida (círculos rellenos de color rojo o azul), en regiones nativas (círculos azules) o invadida (círculos rojos).

Fuente: Fan et al. (2020)

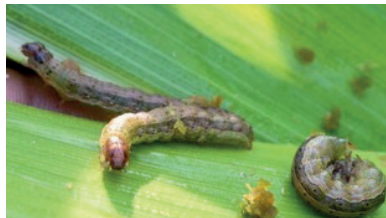


Figura 2. Larva del quinto ínstar *Spodoptera frugiperda*

Fuente: Nagaré (2023).

Hospedantes: al ser *S. frugiperda* un polífago con una amplia gama de hospedantes (Deshmukh, et al., 2021), existen 353 especies de hospedantes diferentes reportadas, predominando la familia de las Poaceae, Asteraceae, Fabaceae y Solanaceae, en los cultivos como: maíz, soya, algodón, alfalfa, tomate y sorgo (Casmuz et al., 2010).

Estrategias de control: se recomienda un control integrado de la plaga, en donde primero se apliquen técnicas de control cultural, como: previo a la siembra, observar en la periferia donde se establecerá el cultivo de maíz si existen algunas gramíneas que sean hospedadoras de este insecto, se pueden eliminar de manera oportuna para evitar la dispersión del adulto con facilidad (Urretabizcaya, 2018). Otro método, es el físico, donde se pueden colocar trampas con la feromona atrayente del adulto; por ejemplo, Pherocon cap® (Acetato de (Z)-9-tetradecenillo y Acetato de (Z)-hexadec-11-enillo). Se pueden colocar de dos a tres trampas por hectárea, mismas que están hechas artesanalmente con botes de 20 Litros de agua, conteniendo en el interior la feromona. Esta estrategia de control debe realizarse una vez que se detecten las primeras emergencias de plántulas de maíz en la parcela, o bien, tomar en cuenta las instrucciones del producto (número de trampas

por hectárea). La implementación de ambas técnicas propicia la conservación de enemigos naturales que se encuentren en el agroecosistema. De manera natural, puede existir una influencia positiva del método de control biológico, mediante la acción de depredadores y parasitoides. Finalmente, se recomienda la aplicación de hongos entomopatógenos; por ejemplo, *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., *Metarrhizium* spp. (Metsch.), entre otras, en etapas fenológicas iniciales de la planta de maíz para evitar que la población de larvas de *S. frugiperda*, crezca. Actualmente, existe una gran variedad de insecticidas de origen vegetal que se pueden utilizar de manera preventiva para el control de larvas y adultos; por ejemplo, *Azadiractina*, *Eucaliptol*, *Hatrophia* spp., etcétera. En el último de los casos, se recomienda el uso de insecticidas sintéticos como método de control químico, y se deben utilizar los productos de última generación, como: Metoxifenocida o Spinosad o el llamado Spinoteram, para el control de las larvas y los adultos de *S. frugiperda*.

2. *Diatraea grandiosella* (Dyar, 1911) (Lepidoptera: Crambidae)

Tabla 2. Clasificación taxonómica

Reino: Animalia
Phylum: Arthropoda
Subphylum: Hexapoda
Clase: Insecta
Orden: Lepidoptera
Familia: Crambidae
Género: <i>Diatraea</i>
Especie: <i>Diatraea grandiosella</i>
Nombre común: Barrenador del tallo del maíz

EPPO (2020).

Distribución: el complejo *Diatraea* spp. se encuentra distribuido en todas las zonas donde se adaptan y desarrollan las gramíneas a nivel mundial. En México, estos barrenadores se han encontrado infestando sorgo, caña de azúcar y algunas malezas como zacate Johnson *Sorghum halepense* (Ramos-Martínez, 2023).

Hospedantes: los hospederos principales son de la familia de las Poaceas, siendo el maíz el que predomina. Sin embargo, la literatura menciona que se han encontrado alimentándose de trigo y arroz, y que, a su vez, tiene un gusto por el zacate Johnson *Sorghum halepense* (Grimi et al., 2018).

Morfología y ciclo biológico: es un insecto de metamorfosis completa: huevo, larva, pupa y adulto. El adulto puede llegar a tener de tres a cinco generaciones al año. El macho es de color marrón y la hembra de una tonalidad más clara, con líneas sobre sus alas. Como en la mayoría de los casos, la hembra es más grande que el macho y con una expansión alar de hasta 30 mm de longitud con manchas oscuras blanquecinas; mientras que el macho su expansión alar es no mayor a 20 mm (Capinera, 2020)

La característica morfológica principal de esta especie está relacionada con su genitalia. Los machos presentan el aedeagus o aparato reproductor de forma triangular, estrechándose en el ápice y formando un pico (Figura 3A). También cuentan con un uncus y gnatos en forma de bastón que mide 1mm (Figura 3B). El margen costal de la valva carece de accesorio estrecho, la juxta cuenta con dos envergaduras laterales y se puede presentar un lóbulo costal basal (Figura 3C) (Ramos-Martínez, 2023).

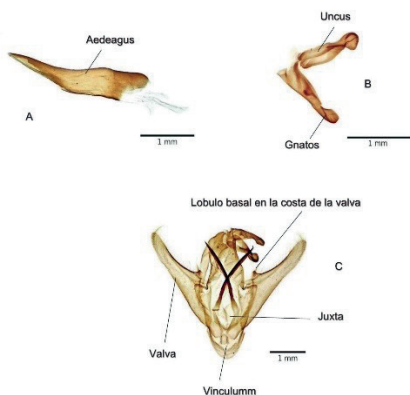


Figura 3. Genitalia masculina de *Diatraea grandiosella* A) Aedeagus, B) Uncus y Gnatos, C) Valva, Vinculum, Juxta y Lobulo Basal en la costa de la Valva

Fuente: Ramos-Martínez (2023).

Estrategias de control: Se recomienda utilizar un manejo integrado de plagas que conlleva el control físico, monitoreando mediante trampas no pegajosas impregnadas con feromonas atrayentes para detectar la presencia de machos adultos de *D. grandiosella*. Utilizando a su vez el control cultural como: la siembra temprana, a principios de invierno para evitar que los adultos emerjan con éxito y así minimizar o evitar el daño en el cultivo de maíz; a su vez, el levantamiento de rastrojo expone las larvas del suelo y reduce la presencia de adultos en primavera. Como método de control biológico, se utilizan algunos organismos entomopatógenos del suelo, como

bacterias y hongos. Algunos ejemplos son: el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin y la bacteria *Bacillus thuringiensis* Berliner var. *kurstaki* utilizados en el control de ínstares larvales de *Diatraea* spp. Así como la utilización de insectos parasitoides como *Lixophaga diatraeae* Townsend y *Cotesia flavipes* Cameron ayudando al control de larvas de *Diatraea* spp. Aunque la medida de manejo más eficaz ha sido la resistencia vegetal con materiales vegetales híbridos modificados genéticamente de maíz con genes que codifican a proteínas de *B. thuringiensis*, los cuales confieren resistencia a una gran gama de plagas del maíz, principalmente lepidópteros. Mientras que el hábitat críptico de las larvas de *D. grandiosella* dificulta el control químico cuando se realizan tratamientos a semillas, o se ejecutan aplicaciones foliares, esto no suprime las poblaciones de este insecto, y, por ende, el control químico es poco eficaz (DGSV-CNRF, 2020).

3. *Helicoverpa* (= *Heliothis*) *zea* (Boddie, 1850) (Lepidoptera: Noctuidae)

Tabla 3. Clasificación taxonómica

Phylum: Arthropoda
Clase: Insecta
Orden: Lepidoptera
Familia: Noctuidae
Género: <i>Helicoverpa</i>
Especie: <i>Helicoverpa Zea</i>
Nombre común: Gusano elotero, gusano del fruto

Reisig (2023).

Distribución: Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Estado de México y Guanajuato; y en Zacatecas, Nayarit, Chiapas y Durango donde se siembra cultivo hospedante (DGSV-CNRF, 2020).

Hospedantes: es un insecto polífago, es decir, por sus hábitos alimentarios puede alimentarse de una gran variedad de especies de plantas; pero tiene una preferencia por el maíz dulce y palomero. También tiene preferencia al sorgo *Sorghum* spp. Sus hospedantes pertenecen a la familia de las Poaceae, Malvaceae, Fabaceae y Solanaceae (SENASICA, 2021a).

Morfología y ciclo biológico: el estadio biológico que puede ser dañino para el cultivo del maíz es la larva, que generalmente se alimenta de los granos tiernos del elote con mayor porcentaje de humedad (Figura 4). Los adultos machos pasan el invierno en el suelo, la palomilla hembra tiene una expansión alar de 3.8 cm, alas anteriores generalmente de un color gris brillante, con líneas irregulares de color negro grisáceo y cuenta con una mancha oscura en la punta del ala.

La hembra oviposita en la misma planta donde se encuentra al estadio larval. La cual, tiene de cinco a siete instares y pupará, dependiendo del aumento de la temperatura; en lugares más cálidos se desarrollará más rápido. La pupa es de color marrón claro y se torna a oscuro, midiendo unos 20 mm de largo, con dos espinas terminales distintas. Se introducen de 5 a 15 cm en el suelo (DGSV-CNRF, 2020).



Figura 4. Larva de *Helicoverpa zea* alimentándose de elote tierno

Fuente: Luna (2020).

Estrategias de control: para el caso del control de *H. zea*, se recomienda realizar monitoreos periódicos previo al “muñequero” del elote, con la finalidad de observar apariciones de adultos o larvas de *H. zea*. Es recomendable realizar control etológico por medio de la implementación de trampas con feromonas atrayentes que puedan engañar al macho y evitar la cópula. Posteriormente, utilizar alguna herramienta del control biológico, mediante el uso de hongos entomopatógenos como *Metharizium anisopilae* para que puedan colonizar larvas. Así como utilizar bioinsecticidas a base de *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill., *Metarrizhium* spp. (Metsch.), etcétera; esto para el control de los adultos de *S. frugiperda*. Como control cultural, se recomienda un paso de rastra en la periferia del cultivo para evitar que hospederos alternos invadan el cultivo (Urretabizkaya, 2018).

4. *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Walker, 1870) (Orthoptera: Acrididae)

Tabla 4. Clasificación taxonómica

Reino: Animalia
Phylum: Arthropoda
Clase: Hexapoda (insecta)
Subclase: Pterigota
Orden: Orthoptera
Suborden: Caelifera
Familia: Acrididae
Género: <i>Schistocerca</i>
Especie: <i>Schistocerca piceifrons piceifrons</i>
Nombre común: Langosta centroamericana

(SENASICA-DGSV, 2016).

Distribución: este insecto se ha encontrado dañando cultivos de maíz y sorgo en Yucatán, Veracruz, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tabasco, Campeche, Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Quintana Roo, Michoacán, Guanajuato (SENASICA, 2023).

Hospedantes: maíz *Z. mays*, Soya *Glycine max*, frijol *Phaseolus vulgaris*, ajonjolí *Sesamum indicum*, sorgo *Sorghum bicolor*, cacahuete *Arachis hypogaea*, algodón *Gossypium hirsutum*, caña de azúcar *Saccharum officinarum*, jitomate *Lycopersicon esculentum*, plátano *Musa paradisiaca*, palma de aceite *Elaeis guineensis*, lima *Citrus aurantifolia*, toronja *Citrus paradisi*, naranja *Citrus sinensis*, mandarina *Citrus reticulata*, limón *Citrus limon*, coco *Cocos nucifera*, agave *Agave tequilana*, arroz *Oryza sativa*, chile *Capsicum annum* (SENASICA-DGSV, 2016).

Morfología y ciclo biológico: los huevos tienen forma de grano de arroz, y su longitud es de 5 a 10 mm y un diámetro de 1 a 2 mm. Cuando la hembra recientemente ha ovipositado el huevecillo es amarillo, pero para el momento de la eclosión el huevo se torna pardo claro. Esta especie se puede diferenciar fácilmente en sus instares ninfales por el número de segmentos en cada uno de ellos.

En el primer instar tiene 17 segmentos antenales, en el segundo aparecen los paquetes alares y 20 segmentos antenales, en el tercero las ninfas tienen la forma similar al adulto, posee 22 segmentos antenales, en el cuarto instar ninfal sus paquetes alares se les puede observar de forma triangular y con 24 segmentos antenales, y en el quinto las alas toman un aspecto que va orientado en posición ventral, que

ya es muy similar al sexto ínstar que tiene 28 segmentos antenales (SENASICA-DGSV, 2016). *Schistocera piceifrons piceifrons* es de metamorfosis paurometabola, los estados inmaduros son similares al adulto, solamente tiene dos generaciones al año, el adulto mide 65 mm de longitud y pesan alrededor de 2 gr, cuenta con ojos compuestos, tiene una franja subocular de color café oscuro y de forma triangular bien marcada cubriendo parte de la gena (Figura 5). El ciclo biológico es de 40 a 44 días; algunas hembras pueden tener solo cinco instares ninfales (Barrientos-Lozano et al., 2021). En su fase solitaria, tiene un color verde claro, en la fase intermedia se torna amarillento, y en su fase gregaria puede ser, rosa o anaranjado rojizo y cuenta con maculaturas negras en las tres etapas.



Figura 5. Adulto de *S. piceifrons piceifrons*

Fuente: SENASICA-DGSV (2016).

Estrategias de control: el control se dirige a los estados inmaduros de *S. piceifrons piceifrons*. Se recomienda realizar muestreos periódicos para observar las primeras apariciones de este insecto. Al ser voraz, y contar con un aparato bucal masticador, puede defoliar fácilmente la planta de maíz en cuestión de seis horas, por lo que se recomienda la aplicación de *M. anisoplae* en instares tempranos del insecto como método de control biológico. Barrientos-Lozano et al. (2005), recomiendan la mezcla de este hongo entomopatógeno con aceite de soya o citrolina. Otro método es el control químico, mediante la aplicación de cipermetrina en formulación sólida para control del adulto, únicamente cuando hay brotes de poblaciones a corto plazo. Poot-Pech (2016) recomienda eliminar plantas hospederas alternas para que no puedan alimentarse y no realicen su oviposición.

5. *Sphenarium purpurascens* (Charpentier, 1842) (Orthoptera: Pyrgomorphidae)

Tabla 5. Clasificación taxonómica

Clase: Hexapoda
Orden: Orthoptera
Suborden: Caelifera
Superfamilia: Acridoidea
Familia: Pyrgomorphidae
Género: <i>Sphenarium</i>
Especie: <i>S. purpurascens</i>
Nombre común: Chapulín de la milpa

SENASICA (2023).

Distribución: Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Chiapas, Ciudad de México, Colima, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Querétaro, Tabasco, Tlaxcala y Veracruz (Bautista, 2023).

Hospedantes: este insecto tiene una gran variedad de plantas hospederas debido a que presenta un hábito de alimentación polífaga. Los cultivos más importantes de los que se alimenta *S. purpurascens* son: maíz, frijol, calabaza, haba, garbanzo, sorgo, alfalfa. Este chapulín se alimenta de plantas silvestres; por ejemplo, girasol silvestre (*Heliantus annuus*) y zacate Jhonson (*Shorgum halepense*); este último comparte más del 90 % de plagas con el maíz (Bautista, 2023).

Morfología y ciclo biológico: Los huevos son ovalados y miden aproximadamente 22 mm de ancho y 8.33 de largo, su coloración café oscuro, cubiertos por una capa en forma de círculos; dándole forma redonda a las células (SENASICA-DGV, 2020).

En el primer ínstar ninfal *S. purpurascens* es muy pequeña, casi imperceptible por el óptico humano, 0.6 mm; en el segundo es muy similar al primero, mide 0.8 mm, su cuerpo es fusiforme y su cabeza un poco más alargada, su coloración es pardo oscura y su cuerpo cuenta con unas manchas bien marcadas; el tercero es muy similar al segundo, pero su tamaño es mayor, mide de 10 a 11 mm y presenta manchas oscuras en su cabeza y a lo largo del cuerpo de forma irregular; el cuarto sigue siendo fusiforme con un aspecto más ancho de la parte media, mide 16 mm, su aspecto es mucho más robusto que los ínstares anteriores, la antena tiene 14 segmentos, sus ojos de color de fondo pardo claro, pero con unas pequeñas rayas color amarillas, y cuenta con paquetes alares en forma de almohadillas. La ninfa

V es de un color irregular por todo el cuerpo, tiene tonalidades pardo-oscuras y marrón, cuenta con patas bien formadas y de colores irregulares (SENASICA-DGV, 2020).

El adulto *S. purpurascens*, cuenta con un cuerpo robusto y fusiforme, no cuenta con alas, ya que son vestigiales (braquípteros), los machos generalmente son más delgados que las hembras y miden unos 2 cm, tiene una cabeza triangular y los ojos son prominentes, tomando como referencia el tamaño de la cabeza. Las tibias son de color pardo oscuro, la coloración de las patas varía en sus tonalidades (SENASICA-DGV, 2020) (Figura 6).

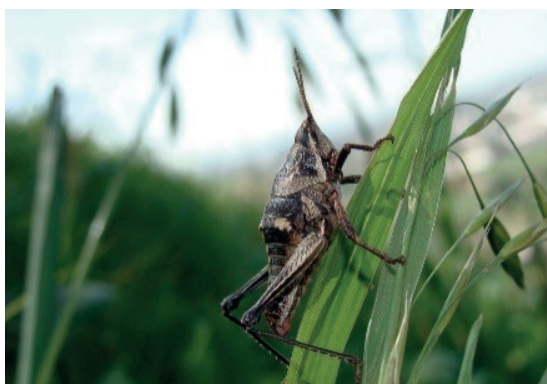


Figura 6. Adulto de *Sphenarium purpurascens*. Tibia con hilera de espinas

Fuente: Venegas-Rico (s.f.).

Estrategias de control: para el manejo integrado de *S. purpurascens* se recomienda realizar monitoreos con la ayuda de redes entomológicas para cuantificar el número de adultos que se tiene en el cultivo. En el caso de esta especie, el umbral económico para ejercer un mecanismo de acción es de 15 ninfas por m² en caminos y bordes, y 5 ninfas por m² dentro del cultivo. Como un control cultural, es la eliminación de plantas hospederas que puedan alojar ínstares inmaduros de *S. purpurascens*.

Para esto, se recomienda realizar un paso de rastra a las plantas arvenses que se encuentran en los bordes de la parcela. Cuando se observan ínstares ninfales primarios es recomendable implementar el control biológico, ya que durante este estadio los insectos tienen poca movilidad y es más fácil rociarlos con *Metarhizium acridum* (Driver & Milner), en una dosis de 2×10^{12} conidios por hectárea. En caso de ser necesario, se utilizará el control químico aplicando fipronil o malatión sobre plantas arvenses que sean vecinas del cultivo de maíz (Bautista, 2023).

Conclusiones

El cultivo de maíz en México se ve constantemente amenazado por plagas clave que afectan tanto su rendimiento como su calidad. Entre las principales se encuentran *Spodoptera frugiperda* (gusano cogollero), *Diatraea grandiosella* (barrenador del tallo), *Helicoverpa zea* (gusano elotero), *Schistocerca piceifrons piceifrons* (langosta centroamericana) y *Sphenarium purpurascens* (chapulín), cuyas plagas ponen en riesgo el desarrollo del cultivo, al alimentarse de hojas, tallos, mazorcas y estructuras reproductivas. Ante este panorama, el manejo integrado de plagas representa una estrategia fundamental, con base en el monitoreo oportuno de las poblaciones plaga, el uso racional de insecticidas, la incorporación de agentes de control biológico, insecticidas de origen vegetal; así como en prácticas culturales sostenibles, entre ellas, la rotación de cultivos, manejo de plantas silvestres hospederas de enemigos naturales y polinizadores. El MIP puede reducir la presión de los organismos dañinos sin poner en riesgo la salud humana.

Referencias

- Araiza, M. D. (2018). Enemigos naturales asociados con el gusano cogollero y el gusano elotero en sorgo y maíz en Irapuato, Guanajuato, México. *Southwestern Entomologist*, 43(3), 715-722. <https://doi.org/10.3958/059.043.0317>
- Ávila-Martínez, D., Cervantes-Ortiz, F., Rodríguez-Pérez, G., Gámez-Vázquez, A. J., García-Rodríguez, J. G. y Mendoza-Elos, M. (2023). Daño y dinámica poblacional del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en líneas élite de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3), 1-12. <http://dx.doi.org/10.15517/am.2023.53809>
- Barrientos-Lozano, L., Hunter, D. M., Ávila-Valdéz, J., García-Salazar, P. y Horta-Vega, J. V. (2005). Control biológico de la langosta centroamericana *Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker (Orthoptera: Acrididae) en el noreste de México. *Vedalia*, 12(2), 119-128.
- Barrientos-Lozano, L., Song, H., Rocha-Sánchez, A. Y. y Torres-Castillo, J. A. (2021). State of the art management of the Central American Locust *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Walker, 1870). *Agronomy*, 11(6), 1-16. doi: 10.3390/agronomy11061024
- Bautista, M. N. (2023). *Insectos y ácaros de importancia agrícola en México*. Colegio de Postgraduados.
- Camacho-Báez, J. R., García-Gutiérrez, C., Mundo-Ocampo, M., Armenta-Bojorquez, A. D., Nava-Pérez, E., Valenzuela-Hernández, J. I. et al. (2012). Enemigos naturales de las moscas de los estigmas del maíz: *Euxesta stigmatias* (Loew), *Chaetopsis massyla* (Walker) y *Eumecosommyia nubila* (Wiedemann) en Guasave, Sinaloa, México. *Ra Ximhai. Revista Científica de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sostenible*, 8(3-2), 71-77.
- Capinera, J. (2020). Order Lepidoptera - caterpillars, moths and butterflies. En J. Capinera. (Ed.), *Handbook of Vegetable Pests* (pp. 353-510). Academic Press.
- Casmuz, A., Juárez, M. L., Socías, M. G., Murúa, M. G., Prieto, S., Medina, S. et al. (2010). Revisión de los hospederos del gusano cogollero del maíz, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 69(3-4), 209-231.
- Cruz, G. K. (2022). *Pérdidas ocasionadas por Sphenarium purpurascens en Zea mays y Medicago sativa, y su manejo a base de hongos entomopatógenos en emulsiones de aceites* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio IPN. http://148.204.117.30/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/667/1/Cruz%20Garc%20ada%20K.%202022.pdf
- Deshmukh, S. S., Prasanna, B. M., Kalleshwaraswamy, C. M., Jaba, J. y Choudhary, B. (2021). Fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*). En Omkar. (Ed.), *Polyphagous pests of crops* (pp. 349-372). Springer.
- EPPO. (2020). *Diatraea grandiosella* (DIATGR). EPPO Global Database. <https://gd.eppo.int/taxon/DIATGR>
- Fan, J., Wu, P., Tian, T., Ren, Q., Haseeb, M. y Zhang, R. (2020). Potential distribution and niche differentiation of *Spodoptera frugiperda* in Africa. *Insects*, 11(6), 1-10. <https://doi.org/10.3390/insects11060383>

- Fernández, J. L. (2002). Nota corta: Estimación de umbrales económicos para *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) en el cultivo del maíz. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal*, 17(3), 468-472.
- González-Maldonado, M. B., García-González, F., de Lourdes Ramírez-Ahuja, M., Chaírez-Hernández, I. y Flores-Villegas, M. Y. (2023). Parasitoides Microhimenópteros de gusano elotero en maíz en Durango, México. *Southwestern Entomologist*, 47(4), 887-894. <https://doi.org/10.3958/059.047.0412>
- Grimi, D. A., Parody, B., Ramos, M. L., Machado, M., Ocampo, F., Willse, A. et al. (2018). Field-evolved resistance to Bt maize in sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*) in Argentina. *Pest Management Science*, 74(4), 905-913. doi: 10.1002/ps.4783
- Hernández-Trejo, A., Osorio, H. E., López, S. J., Ríos, V. C., Varela, F. S. y Rodríguez, H. R. (2018). Insectos benéficos asociados al control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Agroproductividad*, 11(1), 9-14. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/142>
- Hernández-Trejo, A., Estrada Drouaillet, B., Rodríguez-Herrera, R., García Giron, J. M., Patiño-Arellano, S. A. y Osorio-Hernández, E. (2019). Importance of biological control of pests in corn (*Zea mays* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 803-813. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1665>
- Mera, J. L., Vines, L. M., Murillo, D. M. y Chilán, G. R. (2021). The monoculture of corn (*Zea mays*) and its impact on fertility soil. *International Journal of Chemical and Material Sciences*, 4(1), 7-12. <https://doi.org/10.31295/ijcms.v4n1.1649>
- Ortiz, A. E. (2022). *Mortalidad de estados inmaduros de Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) en campo* [Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados]. Repositorio Colposdigital. http://colposdigital.colpos.mx:8080/bitstream/handle/10521/5006/Ortiz_Andrade_E_MC_F_Entomologia_Acarologia_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Poot-Pech, M. A. (2016). La langosta voladora *Schistocerca piceifrons* (Orthoptera: Acrididae): hacia un manejo sustentable. En *El Patrimonio, su Importancia y Conservación. Conociendo el Patrimonio, Cuerpo Académico Patrimonio y Desarrollo Sustentable* (pp. 58-66). Editorial TECCIS.
- Quispe, T. R. (2015). *Refugios vegetales para el fomento de la entomofauna benéfica en el agroecosistema del cultivo de maíz en La Molina* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio LaMolina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e5ac774b-fe63-4464-b4e7-c033deac5629/content>
- Ramos-Martínez, J. A. (2023). *Identificación y fluctuación de Diatraea spp. asociado con gramíneas cultivadas y sus enemigos naturales en el estado de Guanajuato* [Tesis de Doctorado, Colegio de Posgraduados]. Repositorio Colposdigital. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/>

- bitstream/handle/10521/5060/Ramos_Martinez_JA_DC_F_Entomologia_Acarologia_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Reisig, D. (2022). *Helicoverpa zea* (American cotton bollworm). *Invasive Species Compendium*. CABI Digital Library. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.26776#totaxonomicTree>
- Saldamando, C. I. (2016). Biología evolutiva de tres insectos de importancia económica de Colombia: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera, Noctuidae), *Neoleucinodes elegantalis* (Lepidoptera, Crambidae), *Tecia solanivora* (Lepidoptera, Gelechiidae). *Boletín del Museo de Entomología Francisco Luis Gallego*, 8, 6-28.
- SENASICA -Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria-. (2021a). *Gusano elotero Helicoverpa Zea* (Boddie, 1850) (Lepidoptera: Noctuidae). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/633034/Gusano_elotero.pdf
- _____. (2023). *Chapulines de importancia económica en México en cultivo de frijol 2021*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/600964/Chapulines_de_importancia_econ_mica_en_M_xico.pdf
- _____. (2021b). *Gusano cogollero Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/635234/Gusano_cogollero_en_ma_z_y_arroz.pdf
- SENASICA-DGSV. (2016). *Langosta Centroamericana* [Schistocerca piceifrons piceifrons (Walker, 1870)] (Orthoptera: Acrididae). Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157817/Ficha_tcnica_langosta.pdf
- Servín, C. C. y Mendoza, M. G. (2022). Historia de la plaga de langosta centroamericana *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Walker) en México. *Revista Inclusiones*, 9(2), 178-205.
- SIAP -Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-. (2024). *Panorama agroalimentario*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/panorama-agroalimentario-258035>
- Tejeda-Reyes, M. A., Rodríguez-Macié, J. C., Díaz-Nájera, J. F., Vargas-Hernández, M., Bautista-Martínez, N., Hernández-Hernández, S. et al. (2023). Efficacy of selected insecticides in combination with economic thresholds in managing fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in maize grown in Mexico. *Journal of Entomological Science*, 58(2), 166-186. <https://doi.org/10.18474/JES22-31>
- Urretabizkaya, N. (2018). *Manejo integrado de plagas asociadas al cultivo de maíz: Estrategias de control*. Universidad Nacional de Lomas de Zamora. <https://www.maizar.org.ar/documentos/mip%20maizar.pdf>
- Varón de Agudelo, F., Rodríguez-Chalarca, J., Villalobos-Saa, J. C. y Parody-Restrepo, J. (2022). *Manual de enfermedades y plagas del maíz*. Alliance Bioversity & CIAT. <https://alliancebioversityciat.org/publications-data/manual-de-enfermedades-y-plagas-del-maiz>

Zelaya-Molina, L. X., Chávez-Díaz, I. F., de los Santos-Villalobos, S., Cruz-Cárdenas, C. I., Ruíz-Ramírez, S. y Rojas-Anaya, E. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(spe 27), 69-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i27.3251>

Capítulo 10

Las aflatoxinas y su impacto en las etapas de producción del maíz (*Zea mays* L.) y sus derivados

Alejandra Mondragón-Flores¹

Saúl Pardo-Melgarejo¹

Ulises Santiago-López²

Juan Antonio Herrera-González³

Importancia del cultivo

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, señala que más de 197 millones de hectáreas son cultivadas con maíz, con una producción de 1.13 billones de toneladas globalmente (FAOSTAT, 20203).

A nivel mundial, México ocupa el séptimo lugar como productor de maíz, con una producción de poco más de 27 millones de toneladas en 2021. A nivel nacional, su participación en la producción de granos es de 88.2 %, y se siembra en todos los estados del país. Los principales estados productores son el Estado de México, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y Sinaloa (SIAP, 2023).

De acuerdo con la literatura, el maíz se originó hace siete mil años, principalmente en el suroeste de México, específicamente en las zonas bajas. La domesticación de este cereal lo convirtió en el principal sustento de la población, y a su vez permitió que los grupos nómadas se volvieran sedentarios (SADER, 2021). A nivel global, el maíz es uno de los cultivos con mayor producción. Forma parte fundamental de la alimentación de millones de personas y se utiliza como materia prima para alimento humano y animal, así como fuente de biocombustible (Brown et al., 2013). A su vez, tiene un valor cultural significativo, en Mesoamérica se le conocía como “elote”, por lo que la palabra “maíz” proviene de los países del caribe (SADER, 2021).

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Pacífico Centro. Campo Experimental Valle de Apatzingán km 17.5 Carretera Apatzingán-Cuatro Caminos, 60781, Antúnez Michoacán, México.
Correo: mondragon.alejandra@inifap.gob.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. Melchor Ocampo # 7, Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etla, C.P. 68200, Oaxaca.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Pacífico Centro. Campo Experimental de Uruapan. Gran parada

Entre los usos y aplicaciones del maíz, se obtienen productos diversos: mieles fructosadas, semillas, topos, almidones, aceites y la tortilla, que es fundamental en la canasta básica de la población mexicana (Shephard et al., 2013). El consumo per cápita en México es de 350 gramos diarios de productos derivados del maíz, incluyendo la tortilla y otros platillos de la gastronomía mexicana que se obtienen de la nixtamalización (SADER, 2021).

Contaminación de granos

La calidad e inocuidad de los alimentos es de suma importancia, ya que afecta directamente a los consumidores, cuya cantidad aumenta cada año. Las empresas productoras de alimentos y agricultores deben garantizar la inocuidad de los alimentos. Algunos estudios indican que la contaminación de granos se ha incrementado entre un 60 y un 80 % a nivel mundial. Este aumento se atribuye, en parte, a la mejora en la sensibilidad de los métodos de detección analítica y a los efectos del cambio climático (Eskola et al., 2020). Respecto a la comercialización nacional e internacional, se exige cada vez más que los productos sean inocuos. Sin embargo, aproximadamente el 15 % de los alimentos que se comercializan contienen sustancias residuales, como plaguicidas y toxinas. Estos componentes representan un riesgo para los consumidores, ocasionando problemas de salud pública. Por ello, es necesario mantener la inocuidad sanitaria desde las primeras etapas de la cadena productiva (Schmidt et al., 2016).

Como materia prima para obtener derivados de maíz, se utilizan semillas de calidad, ya que impactan directamente en los productos finales. Esto beneficia tanto a la industria alimentaria como a los productores y consumidores (Shephard et al., 2013). La contaminación del maíz y de sus productos derivados es un foco de atención. Debido a su naturaleza orgánica, este cereal es propenso a contaminarse con hongos que producen micotoxinas, lo que genera pérdidas económicas en la agricultura y la industria alimentaria (Nji et al., 2020). Ante ello, es preocupante la presencia de hongos toxigénicos y de micotoxinas en el maíz producido en diversas regiones del mundo, incluido el noreste de México, así como en países de América, África y Europa. Esto es relevante porque gran parte de la producción de este cereal en África y América Latina está destinado al consumo humano. En Sudáfrica, en el periodo 2021-22, la producción alcanzó 15 387 200 ton, con un consumo per cápita de 222 gr por día (GrainSa, 2023; Martínez-Padrón et al., 2013).

Las micotoxinas

Actualmente, se conocen más de 400 micotoxinas, pero las más representativas e importantes, por el impacto económico y en la salud, son las aflatoxinas, fumonisinas, ocratoxinas, deoxinivalenol, zearalenona y patulina. Las micotoxinas, se producen de forma natural por especies de hongos filamentosos, además se consideran como metabolitos secundarios con potencial tóxico. Los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Fusarium* son los hongos más reconocidos como productores de las micotoxinas más comunes y tóxicas; a su vez, no pueden eliminarse ni prevenirse aún con prácticas agrícolas. Algunas especies de *Fusarium* que se ha reportado que infectan el maíz son *F. verticillioides*, *F. graminearum* y *F. poae* y su presencia se ha detectado mayormente en condiciones de campo (Degraeve et al., 2016). El rango de crecimiento de estos hongos va de los 8 a 55 °C, con una temperatura óptima de 36 a 38 °C. Los hongos productores de micotoxinas utilizan los granos de cereales como sustrato para su crecimiento, tanto antes de la cosecha como durante el almacenamiento. La producción de aflatoxinas inicia a temperaturas entre 11 y 14 °C; sin embargo, la mayor producción ocurre entre 25 y 35 °C (Carvajal, 2013; Reddy et al., 2010).

Cada año, aproximadamente, el 25 % de los productos agrícolas del mundo se contaminan con micotoxinas. Esto provoca la disminución de la calidad nutricional y viabilidad sanitaria tanto de grano como de semilla, lo que contribuye a la pérdida de casi mil millones de toneladas de alimentos (Carvajal, 2013; Strokes et al., 2017).

Algunos de los efectos que pueden provocar las micotoxinas, dependiendo del tipo de toxina, dosis, sexo, salud, edad y estado nutricional del individuo expuesto, son: carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad, estrogenia, neurotoxicidad, inmunotoxicidad y muerte (Reddy et al., 2010).

Las aflatoxinas

Las aflatoxinas (AF) son toxinas naturales que pertenecen al grupo de las micotoxinas. El término aflatoxina proviene de a= *Aspergillus*, fla= flavus y toxina= veneno. Fueron descubiertas en 1960 en la Gran Bretaña, tras la muerte de miles de aves de corral que fueron alimentadas con un tipo de cacahuete contaminado con *Aspergillus flavus* y aflotoxinas provenientes del Brasil.

En México, durante la década de 1990, tomó importancia la investigación sobre el efecto de las aflatoxinas (AF) en la población infantil, debido al consumo de alimentos contaminados originados a partir de animales productores de leche (Carvajal et al., 2013). Las AF son derivados de la difuranocumarina, sintetizadas por una vía policétida por cepas de *A. flavus* y *A. parasiticus*.

Es más común encontrar *A. flavus* como contaminante en productos agrícolas, en materias primas destinadas a la preparación de alimentos balanceados para ganado, y como residuo tóxico en la leche, huevo o carne.

Otras especies productoras de AF pero menos frecuentes son *A. bombycis*, *A. ochraceus*, *A. nomius* y *A. pseudotamari* (Kumar et al., 2017; Martínez-Padrón et al., 2013). Las AF son más frecuentes en las regiones tropicales y subtropicales, donde afectan cultivos básicos, incluidos cereales, legumbres, frutos secos y especias. Los cultivos más susceptibles son el maíz y el cacahuete, por lo que la contaminación es más frecuente (Strokes et al., 2017). Para el crecimiento de hongos productores de aflatoxinas, es necesario que estén en condiciones adecuadas, tanto en el campo como en el almacenamiento (al quinto día disminuyendo al octavo día). Los factores que favorecen su crecimiento son el tipo de sustrato, factores biológicos, bioquímicos y ambientales (Carvajal, 2013).

La capacidad de producción de AF de cada especie fúngica varía cualitativa y cuantitativamente, teniendo varias denominaciones, B1, B2, G1 y G2. “B” y “G” se refieren a la fluorescencia azul o verde, observada con la exposición de la toxina a la irradiación ultravioleta (Reddy et al., 2010). La forma B1 es la más común y frecuente en los alimentos básicos y es uno de los mutágenos naturales más potentes y carcinógenos conocidos. De hecho, está clasificado como Grupo 1 cancerígeno por la Agencia Internacional para la Investigación sobre Cáncer (IARC, 1993). El riesgo de aflatoxicosis humana es mayor en los países en desarrollo, donde no existen o no están vigentes algunas de las regulaciones sobre aflatoxinas y los cultivos se desarrollan sin monitorear la presencia de estas toxinas (Wild y Gong, 2010).

Por ejemplo, en un estudio en granos, harinas de maíz, moringa y cacahuete en Haití, demostraron que en su mayoría estaban contaminados con AF tipo B1, con concentraciones de hasta 228 mg kg⁻¹, 57 y 11 veces superior a los niveles máximos permitidos en Europa y Estados Unidos, respectivamente (Aristil et al., 2020).

Aflatoxinas en el maíz

Existen dos grupos de micotoxinas que afectan al maíz y sus derivados: las aflatoxinas y fumonisinas. Además, existen otras que se pueden encontrar en el maíz; por ejemplo, el deoxinivalenol (vomitoxina) y sus derivados (Leslie et al., 2021). Aunque *Aspergillus*, sección Nigri, produce ocratoxinas es considerado junto con *A. flavus* Link:Fr, uno de los principales problemas de seguridad alimentaria a nivel mundial debido a que ambos son considerados patógenos del maíz (Kumar et al., 2017; Spencer et al., 2019). Las especies de este género se encuentran en el suelo antes de la cosecha, por lo tanto, la contaminación también puede ocurrir durante

o después de la cosecha, debido al calor y la humedad que favorecen la propagación del hongo y la síntesis de la toxina (Strokes et al., 2017).

A. flavus puede colonizar varias especies de plantas, afectando semillas por encima y por debajo del nivel del suelo; generalmente sobrevive en el suelo o en residuos de plantas entre un ciclo de cultivo y otro (Dövényi-Nagy et al., 2020).

Anteriormente, se consideraba que la contaminación por AF solo era un problema posterior a la cosecha; sin embargo, en 1975 se comprobó la presencia de AF antes de la cosecha. A partir de este hallazgo, se consideró a la resistencia genética de la planta hospedante como la principal solución (Spencer et al., 2019). En México, por ejemplo, en un trabajo desarrollado en Tamaulipas, 72 % de las muestras de maíz colectadas en campo presentaron contaminación por AF con niveles que oscilaron entre 20-233 $\mu\text{g kg}^{-1}$, valores que estaban por encima de los que marcan las normas para su comercialización (Marínez-Flores et al., 2003). Por otro lado, estudios realizados en Tepatlán, Jalisco, indicaron contaminación por AF y otras micotoxinas como deoxinivalenol y zearalenona en el rastrojo que provenía de 17 genotipos de maíz. Sin embargo, en todos los casos los promedios detectados se mantuvieron dentro de los límites tolerables de la normatividad mexicana. La presencia de micotoxinas sugiere que se deben hacer muestreos frecuentes para asegurar la salud de los consumidores (Reyes et al., 2014).

Establecimiento de hongos productores de AF en el maíz

Es de suma importancia conocer el punto de contaminación del maíz en la cadena de producción, desde la siembra hasta que los granos se van formando, durante el almacenamiento, sobre todo si existen condiciones de humedad, y durante la industrialización del grano de maíz; por lo que productos como grano molido, entero, harinas, alimentos para uso animal y pastas pueden contaminarse (Martínez-Padrón et al., 2013). Algunas investigaciones sugieren que el incremento de los niveles de aflatoxinas en maíz se debe a condiciones climáticas extremas y que se concentran en granos inmaduros, dañados, arrugados y descoloridos (Kos et al., 2018; Matumba et al., 2015). La infección de la planta se produce por conidios, siendo la floración la etapa más susceptible. La colonización de los granos de maíz puede ocurrir durante todo el crecimiento y se ve favorecida por el daño de los insectos, el estrés por sequía, las temperaturas altas y las condiciones de alta humedad (Dövényi-Nagy et al., 2020).

Medidas para reducir la contaminación por aflatoxinas

Uno de los principales productos alimenticios en México es el maíz, por ello es necesario controlar, reducir o evitar la infección por hongos que producen aflatoxinas en mazorcas. Esto con la finalidad de garantizar la inocuidad del grano.

Algunas medidas consisten en la modificación de las fechas de siembra, de modo que la fase fenológica susceptible del maíz (floración) no coincida con la presencia de hongos aflatoxigénicos y con las condiciones ambientales favorables para su desarrollo. También es importante tener conocimiento del ciclo biológico de los patógenos para atacarlos en su etapa más vulnerable (Dövényi-Nagy et al., 2020; Martínez-Padrón et al., 2013).

Además, es necesario realizar el control y manejo adecuado de insectos y hongos que contemplen estrategias químicas y biológicas. Otro aspecto importante, es la selección del material genético con resistencia a sequía, enfermedades, plagas y altos rendimientos de grano; así como observar el procesamiento del grano, las prácticas postcosecha, los métodos de secado rápido y el almacenamiento en las condiciones adecuadas (Brown et al., 2013).

En conjunto, estas medidas reducirán poco a poco los daños ocasionados por hongos productores de micotoxinas en la planta de maíz y en los consumidores (Kos et al., 2018; Martínez-Padrón et al., 2013). Durante la cosecha, se recomienda retirar todo el maíz partido, el polvo y material extraño que puede servir como contaminante, usar contenedores de almacenamiento limpios, desinfectados y funcionales para reducir la humedad. Además, mantener limpio para evitar la presencia de roedores (Brown et al., 2013). Aunado a lo anterior, prevenir la contaminación durante sus etapas de posible desarrollo o cerca de la cosecha, permitirá un manejo adecuado del riesgo de AF en la industria por parte de agricultores, distribuidores o productores de piensos (Kos et al., 2018). Para la elaboración de harinas y tortillas, es importante que los granos de maíz pasen por el proceso de nixtamalización que a continuación se describe.

Nixtamalización

El proceso de nixtamalización se originó en Mesoamérica, y surgió cuando el grano de maíz era sometido a una cocción con cal ($\text{Ca}(\text{OH})^2$). Durante el tratamiento, se degradan y eliminan partes del grano como el pericarpio. La cocción suaviza la estructura del endospermo, permitiendo la difusión de iones de calcio con el agua hacia la parte interna del grano. Posteriormente, le sigue un reposo de 24 horas y, como paso final, la mezcla de maíz, agua y cal se lava para eliminar exceso de cal y restos de pericarpio (Gutiérrez-Cortez et al., 2013).

Este proceso inhibe un alto porcentaje de aflatoxinas (sustancias tóxicas naturales presentes en el maíz) e implica cambios bioquímicos importantes. Los granos nixtamalizados se enriquecen con calcio y otros minerales, y se liberan precursores de niacina (vitamina B3), que favorece la transformación de los alimentos en energía y mejora la biodisponibilidad de las proteínas (CIMMYT, 2020). Otros aminoácidos que se ven afectados de forma positiva durante la nixtamalización, es la proporción de isoleucina/leucina, ya que esta combinación se balancea, lo que permite una mejor absorción del triptófano, principal precursor de la niacina (vitamina B3) que participa en procesos de síntesis de algunas hormonas, principalmente las de crecimiento y evita la aparición de la enfermedad conocida como “pelagra” que se caracteriza por ser una tétrada que involucra dermatitis, diarrea, demencia y, en casos graves, la muerte (López y Otero, 2021). Los productos resultantes de la nixtamalización, como la tortilla y las harinas para la elaboración de alimentos, presentan una alta calidad nutricional (SADER, 2021).

Perspectivas

En México, el maíz es el cereal de mayor importancia histórica y cultural, además de ser la base en la dieta alimenticia. Ante el escenario del cambio climático, es fundamental desarrollar nuevas variedades adaptadas a climas extremos, resistentes a plagas y hongos, con durabilidad en almacén y con mejores rendimientos. Además de utilizar mejores métodos agronómicos y el uso racional de fungicidas, es importante elaborar guías y protocolos de almacenamiento y procesamiento de granos, que establezcan medidas de detección y prevención para reducir la contaminación por hongos productores de AF. Finalmente, es necesario duplicar esfuerzos en la investigación y el desarrollo de herramientas moleculares que permitan identificar, de forma rápida y certera, tanto la resistencia del maíz como la presencia de AF en los alimentos.

Conclusiones

Las AF son metabolitos secundarios que tienen un efecto negativo en la salud de las personas, pueden estar presentes en varios alimentos de consumo común, por lo que el riesgo de intoxicación es alto. Aunque hay estudios de las condiciones favorables de desarrollo de los hongos productores de toxinas, es difícil evitar que se reproduzcan en el campo. Esto afecta negativamente la salud pública y genera pérdidas millonarias en el sector agrícola. Por esta razón, es importante mejorar los sistemas de producción, manejo, almacenamiento de alimentos y determinación de la incidencia de las AF en el cultivo del maíz en México. Aunque en este país existe una normatividad que determina la cantidad permitida de ciertas AF en los alimentos, se requiere reforzarla; a la par de impulsar el análisis de alimentos destinados a la población mas vulnerable como los niños y personas de la tercera edad.

Referencias

- Abbas, H. K., Mirocha, C. J., Rosiles, R. y Carvajal, M. (1988). Decomposition of zearalenone and deoxynivalenol in the process of making tortillas from corn. *Cereal Chemistry*, 65(1), 15-19.
- Aristil, J., Venturini, G., Maddalena, G., Toffolatti, S. L. y Spada, A. (2020). Fungal contamination and aflatoxin content of maize, moringa and peanut foods from rural subsistence farms in South Haiti. *Journal of Stored Products Research*, 85, 101550. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.101550>
- Brown, R. L., Menkir, A., Chen, Z. Y., Bhatnagar, D., Yu, J., Yao, H. et al. (2013). Breeding aflatoxin-resistant maize lines using recent advances in technologies - a review. *Food Additives & Contaminants: Part A Chemistry, Analysis, Control Exposure & Risk Assessment*, 30(8), 1382-1391. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.812808>
- Carvajal, M. (2013). Transformación de la aflatoxina B1 de alimentos, en el cancerígeno humano, aducto AFB1-ADN. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 16(2), 109-120.
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2020). *CIMMYT*. <https://idp.cimmyt.org>
- Degraeve, S., Madege, R. R., Audenaert, K., Kamala, A., Ortiz, J., Kimanya, M. et al. (2016). Impact of local pre-harvest management practices in maize on the occurrence of *Fusarium* species and associated mycotoxins in two agro-ecosystems in Tanzania. *Food Control*, 59(1), 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.028>
- Dövényi-Nagy, T., Rácz, C., Molnár, K., Bakó, K., Szláma, Z., Jóźwiak, Á. et al. (2020). Pre-harvest modelling and mitigation of aflatoxins in maize in a changing climatic environment- A review. *Toxins*, 12(12), 768. <https://doi.org/10.3390/toxins12120768>
- Eskola, M., Kos, G., Elliott, C. T., Hajslova, J., Mayar, S. y Krska, R. (2020). Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(16), 2773-2789.
- FAOSTAT. (2023). *Índices de producción*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QI>
- GrainSA. (2023). *Production CEC white and yellow, South Africa*. <https://www.grainsa.co.za/pages/industry-reports/production-reports>
- Gutiérrez-Cortez, E., Rojas-Molina, J. I., Zambrano-Zaragoza, M. L., Quintanar-Guerrero, D., González-Reza, R. M., Rojas-Molina, A. et al. (2013). Effect of processing conditions on the production of nixtamalized corn flours by the traditional method. *CYTA-Journal of Food*, 11(1), 46-53.
- International Agency for Research on Cancer -IARC-. (1993). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. IARC Lyon France.

- Kos, J., Janić Hajnal, E., Šarić, B., Jovanov, P., Mandić, A., Đuragić, O. et al. (2018). Aflatoxins in maize harvested in the Republic of Serbia over the period 2012-2016. *Food Additives and Contaminants. Part B, Surveillance*, 11(4), 246-255.
- Kumar, P., Mahato, D. K., Kamle, M., Mohanta, T. K. y Kang, S. G. (2017). Aflatoxins: A global concern for food safety, human health and their management. *Frontiers in Microbiology*, 17(7), 2170.
- Leslie, J. F., Moretti, A., Mesterházy, Á., Ameye, M., Audenaert, K., Singh, P. K. et al. (2021). Key global actions for mycotoxin management in wheat and other small grains. *Toxins*, 13(10), 725. <https://doi.org/10.3390/toxins13100725>
- López, D. y Otero, G. (2021). Pelagra: una enfermedad antigua en un mundo moderno. *Nutrición Hospitalaria*, 38(3), 667-670. <https://dx.doi.org/10.20960/nh.03513>
- Martínez-Flores, R., García-Aguirre, G. y Melgarejo-Hernández, J. (2003). Inspección de aflotoxinas en maíz cultivado, almacenado y transportado en Tamaulipas, México, en 1998. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 74(2), 313-321.
- Martínez-Padrón, H. Y., Hernández-Delgado, S., Reyes-Méndez, C. A. y Vázquez-Carrillo, G. (2013). El género *Aspergillus* y sus micotoxinas en maíz en México: Problemática y perspectivas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31(2), 126-146.
- Matumba, L., Van Poucke, Ch., Ediage, E. N., Jacobs, B. y De Saeger, S. (2015). Eficacia de la clasificación manual, flotación/lavado, descascarillado y combinaciones de los mismos en la descontaminación de maíz blanco contaminado con micotoxinas. *Food Additives and Contaminants: Part A*, 32(6), 960-969. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1029535>
- Schmidt, M., Horstmann, S., De Colli, L., Danaher, M., Speer, K., Zannini, E. et al. (2016). Impact of fungal contamination of wheat on grain quality. *Journal of Cereal Science*, 69(1), 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.02.010>
- Shephard, G. S., Burger, H. M., Gambacorta, L., Krska, R., Powers, S. P., Rheeder, J. P. et al. (2013). Mycological analysis and multimycotoxins in maize from rural subsistence farmers in the former Transkei, South Africa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(34), 8232-8240. <https://doi.org/10.1021/jf4021762>
- Secretaría de Información Agrícola y Pesquera -SIAP-. (2023). Cierre agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Spencer, J., Williams, W. y Windham, G. L. (2019). Aflatoxin in maize: A review of the early literature from “moldy-corn toxicosis” to the genetics of aflatoxin accumulation resistance. *Mycotoxin Research*, 35(2), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s12550-018-00340-w>

- Stokes, H. M., Sobel, B., Davis, V. R. y Gonzalez, C. (2017). *Aflatoxin management for smallholder farmers of maize & groundnuts: Practices and technologies for detection & prevention*. Internal CRS Document.
- Wild, C. P. y Gong, Y. Y. (2010). Mycotoxins and human disease: A largely ignored global health issue. *Carcinogenesis*, 31(1), 71-82. <https://doi.org/10.1093/carcin/bgp264>

Algunas obras del mismo coordinador:

- Abejas sin aguijón: meliponas con diversidad, potencial funcional, terapéutico y biotecnológico

Consulta estos títulos dentro del catálogo de Libros UAT del Consejo de Publicaciones en el siguiente enlace:



<https://libros.uat.edu.mx>

 <https://publicaciones.uat.edu.mx>

Equipo editorial

Coordinación: Venancio Vanoye Eligio

Gestión y administración: Jessica Abigail Rodríguez Tinajero, María Teresa Maldonado Sada

Revisión y corrección de estilo: José Luis Énder Velarde García, Jorge Alberto Vázquez Herrera

Diseño y maquetación: Erika González Navarro, Wendy Castillo Cruz, Lorena E. Cortez Rodríguez

El maíz (Zea mays): un tesoro alimenticio
de Verónica Hernández Robledo, coordinadora,
publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y
Editorial Fontamara en junio de 2025. La revisión y diseño editorial
correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

El maíz (*Zea mays*) es un cereal con antigüedad ancestral, una planta noble y de fácil domesticación debido a sus características y condiciones de crecimiento. Este grano, además de tener un valor económico, tiene importancia a nivel social, cultural y religioso.

Se destaca también por su valor nutricional, composición química que está constituida por macronutrientes como carbohidratos, grasas, proteínas, fibra y algunos micronutrientes como vitaminas (A, C, E), además de otros componentes como antioxidantes, hierro, cobre, potasio, zinc, magnesio, manganeso y fósforo entre otros.

Esta composición está presente en más de sesenta variedades destinadas para alimento humano y alimento animal. Los alimentos que se pueden elaborar a partir de este grano son la tortilla, considerada el primer producto de la canasta básica en nuestro país, otros productos derivados son las tostadas, tamales, totopos, quesadillas, botanas, esquites, palomitas, bebidas, panes, sopas, platos fuertes, postres, etcétera, además de tener aplicaciones industriales y biotecnológicas.

A nivel mundial es uno de los cereales con mayor producción; Estados Unidos, China y Brasil destacan en este rubro. México ocupa la séptima posición, pero en exportación se encuentra en el segundo lugar; le siguen países como Japón y Argentina. A nivel nacional el maíz se cultiva en los treinta y dos estados del país, principalmente Guanajuato, Michoacán, Sinaloa, Jalisco y Estado de México.

En este libro se abordan diversos temas de interés como el proceso industrial, el valor nutritivo, los subproductos que pueden ser aprovechados de forma integral, el potencial valor agregado, la variabilidad genética, la legislación actual aplicable al manejo, uso y comercialización; las nuevas tecnologías implementadas en el manejo de los cultivos, entre otros temas.

ISBN UAT: 978-607-8888-84-9
ISBN Fontamara: 978-607-736-991-2

ISBN: 978-607-736-991-2

