Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

La biodiversidad del maíz mexicano y su aprovechamiento
Biodiversity of Mexican Maize and its use

Ramírez-Esparza, U.[1], Agustín-Chávez, M.C.[1], Ochoa-Reyes, E.[1], Alvarado-González, S.M.[2], López-Martínez, L.X.[3], Ascacio-Valdés, J.A.[4], Buenrostro-Figueroa, J.J.[1]*

[1] Laboratorio de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Subsede Delicias, 33089, Delicias, Chihuahua.

[2] Laboratorio de Microbiología y Biología Molecular, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo Subsede Delicias, 33089, Delicias, Chihuahua.

[3] CONAHCYT-CIAD, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, 83301, Hermosillo, Sonora.

[4] Grupo de Bioprocesos y Bioproductos, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, 25280, Saltillo, Coahuila.

uramirez223@estudiantes.ciad.mx; magustin123@estudiantes.ciad.mx; emilio.ochoa@ciad.mx; salvarado@ciad.mx; leticia.lopez@ciad.mx; alberto_ascaciovaldes@uadec.edu.mx; jose.buenrostro@ciad.mx*

Innovación tecnológica: Aprovechamiento de la planta de maíz.
Área de aplicación industrial: Obtención de productos y alimentos.

Recibido: 22 abril 2024
Aceptado: 28 abril 2025

Abstract

Maize is a source of food for many people around the world, making it an important global crop; it is also used for livestock feed, as well as a raw material in the biofuel industry. In 2023, Mexico produced around 27.5 million tons of grain corn. There are 64 breeds of this cereal documented in Mexico, which have a great variety of pigmentation due to the different phenolic compounds they contain, such as anthocyanins. These corn varieties were studied and cataloged by the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO), which classified the 64 landraces into seven major groups: "Conical", "Sierra de Chihuahua", "Eight-row", "Chapalote", "Early Tropical", "Tropical Toothed" and "Late Ripening". Corn has been consumed for thousands of years and recently its consumption demand has been increasing. Also, in the last decades, more studies have been carried out on its functional properties, as well as on the use of plant residues to obtain bioactive compounds. The objective of this work is to explore the state of the art, identify and highlight aspects related to the general characteristics of maize, the breeds and their populations cultivated in Mexico, the general physicochemical and nutritional composition of maize, and the bioactive compounds present in this plant.

Keywords: *Zea mays*, Phytochemicals, Processing.

Resumen

El maíz es una fuente de alimento para muchas personas en el mundo, convirtiéndolo en un importante cultivo a nivel mundial; se emplea también para la alimentación ganadera, así como materia prima en la industria de biocombustibles. En 2023, México produjo alrededor de 27.5 millones de toneladas de maíz de grano. Esta documentada la existencia de 64 razas de este cereal en México, las cuales presentan una gran variedad de pigmentación debido a que contienen diferentes compuestos fenólicos, como las antocianinas. Estos maíces fueron estudiados y catalogados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la cual clasificó las 64 razas en siete grandes grupos: “Cónico”, “Sierra de Chihuahua”, “Ocho hileras”, “Chapalote”, “Tropicales precoces”, “Dentados tropicales” y “Maduración tardía”. El maíz se consume desde hace miles de años y recientemente su demanda de consumo ha ido en aumento. Asimismo, en las últimas décadas se han realizado más estudios sobre sus propiedades funcionales, así como, sobre el aprovechamiento de los residuos de la planta para la obtención de compuestos bioactivos. El objetivo de este documento es explorar el estado del arte, identificar y destacar aspectos relacionados a las características generales del maíz, las razas y sus poblaciones cultivadas en México, la composición fisicoquímica y nutricional general del maíz y los compuestos bioactivos presentes en esta planta.

Palabras clave: *Zea mays, Fitoquímicos, Procesamiento.*

1. Introducción

La domesticación de plantas es la base de la alimentación en el mundo, entre las que destaca el maíz, el cual contribuye al sustento diario de parte importante de la humanidad. Existen diversas teorías sobre el origen o domesticación del maíz, siendo la teoría del Teosinte la más aceptada y reportada. Esta teoría fue planteada por Beadle en el siglo XX [1], quien considera que el origen del maíz se atribuye al teosinte (derivado de "teocintli" en idioma náhuatl: "teotl" = dios y "cintli" = maíz en mazorca), siendo este el único antepasado silvestre del maíz, por lo cual se ha aceptado ampliamente como el modelo más probable de evolución del maíz, con base en pruebas taxonómicas, genéticas y de otro tipo [2]. Se han descubierto en cuevas de habitantes primitivos en México pequeñas mazorcas de maíz, que comprueban que este cereal se ha utilizado como alimento humano desde hace más de 7000 años [3, 4].

El maíz es fuente de alimento en muchas poblaciones a nivel mundial, convirtiéndolo en un cultivo de importancia. Los suministros mundiales de maíz alcanzaron niveles máximos históricos en 2018/2019, y se pronostica que el uso mundial de maíz se expandirá a nuevos máximos en los próximos cinco años [5]. La producción mundial de maíz es requerida por tres sectores (alimentación humana, alimentación ganadera y materia prima en la industria de biocombustibles). La FAO reportó que en el 2022, la producción de maíz, alcanzará un incremento en la producción anual, a raíz de la demanda industrial y crecimiento de la población. En 2023, México produjo alrededor de 27.5 millones de t de maíz de grano, de las cuales 12 mil fueron de maíz azul y 60 mil de maíces de diferentes coloraciones (excluyendo el blanco y el amarillo) [6].

Kato, Mapes [1] reportaron la existencia en el continente americano de entre 220 y 300 razas de maíz, mientras que en México se reportaron 64 razas de maíces de diversos colores: como lo son negro, blanco, rojo, morado, amarillo, que muestran una extraordinaria diversidad fenotípica y genética sin similitudes con ninguno de sus parientes silvestres. Los diferentes genotipos son consecuencia de la domesticación de grupos de poblaciones ancestrales adaptados a condiciones climáticas y geográficas. Esto para satisfacer las necesidades humanas específicas y que permiten encontrar el maíz a nivel del mar, en climas cálidos, a más de 3400 m de altitud, también en climas templados, con temperaturas medias desde 12 hasta 29.1 ºC y de 400 a 3555 mm de precipitación durante la estación de crecimiento [7, 8].

En México se cultiva el maíz principalmente para consumo humano, bajo diversas condiciones climatológicas. Su consumo representa una fuente de energía y de proteínas, en regiones rurales y de bajo nivel socioeconómico. El maíz es consumido todos los días por millones de mexicanos, en diversas presentaciones en platillos regionales, o simplemente en forma de tortilla, que es su derivado más importante. En la presente revisión se abordan aspectos relacionados a las características generales del maíz, las diferentes razas y poblaciones cultivadas en México, su composición fisicoquímica, los compuestos bioactivos presentes y las características nutricionales.

2. Poblaciones de Maíz

Existe una gran diversidad de maíz, se estima que cada día se incrementan, debido a la polinización natural [9]. Así como a usos y costumbres de los agricultores, ya que año con año mantienen o intercambian semillas, ya sea propias o con otros productores de diferentes localidades y/o regiones. Los agricultores aplican prácticas dinámicas para seleccionar semillas y manejar sus campos, basándose en el conocimiento tradicional. Esto crea poblaciones de maíz que tienen variación en su forma y funcionamiento, con una diversidad genética adaptada a las condiciones locales [10, 11]. Lo anterior promueve modificaciones no intencionales a las poblaciones locales de maíz, ya que se ha estimado que solo el 3% de los genes del maíz han sido modificados de manera intencional [12]. La mejora de los cultivos se logra aprovechando los rasgos importantes que existen gracias a la gran diversidad del maíz, tanto en su apariencia como a nivel molecular. Esto permite aumentar los rendimientos y mejorar las características necesarias para cultivarlo en distintos ambientes [13, 14].

México ha sido denominado el centro de domesticación del maíz, donde se genera una gran diversidad fenotípica de este cultivo. El modelo de domesticación del maíz incluye la diversidad presente en las poblaciones locales, que surge a través de la diversificación racial y se enriquece mediante esquemas de selección específicos. Los esquemas de selección son procesos organizados que los mejoradores de plantas utilizan para elegir y cruzar los individuos con los mejores rasgos. Lo anterior ayuda a identificar y seleccionar plantas con características deseables, como mayor rendimiento, mejor calidad del grano, y mayor resistencia al estrés biótico o abiótico. Junto con técnicas modernas de mejoramiento como la creación de líneas endogámicas, se logran avances significativos como la madurez optimizada y una mejor tolerancia a la sequía [15, 16]. Estas prácticas han producido plantas de maíz con alturas que van desde apenas 50 cm hasta 6 m, y con un número de hojas por planta que varía entre 10 y 20, con una amplia diversidad en el color del tallo, ya sea verde, rojizo o morado. Algunas plantas desarrollan solo una mazorca, mientras que otras pueden tener

hasta 10 pequeñas. Las mazorcas también varían significativamente en tamaño, desde 5 hasta 40 cm de longitud, y pueden tener entre 8 y 30 hileras de granos. Aunque las mazorcas suelen ser cilíndricas o cónicas, algunas son casi redondas. Se conocen diferentes poblaciones de maíz, quizá la mayoría provengan de la mezcla de dos o más razas y es probable que no exista una raza "pura". Cada raza puede presentar una amplia variedad de formas de mazorca, colores y texturas de grano, así como distintas adaptaciones y una notable diversidad genética. [8].

Existen granos de maíz en colores blancos, amarillos, azules, rojos, morados y casi negros. Existen los moteados y jaspeados, otros que aparentan tener un pericarpio mas grande y duro; poseen una morfología muy diversa, que puede ser redonda, endentada, puntiaguda y algunos con forma encogida que se ve corrugada [4]. También presentan diferentes texturas (cristalina, harinosa o cerosa), existen dulces, reventadores (maíz palomero), algunos son muy pequeños, largos, cortos y algunos muy anchos que casi alcanzan los 2 cm [17]. Según la base de datos del SIAP, la producción nacional de maíz se agrupa por variedad, siendo estos blanco, amarillo, pozolero, color, sin clasificar y azul [6].

3. Razas de maíz en México

El término raza sirve para agrupar individuos o poblaciones con características fenotípicas compartidas, se cuenta con un registro de 220 razas de maíz en América Latina [18], de las cuales 59 son originarias de México y cinco más también se encuentran en países de América Latina (del Caribe, Cubano Amarillo y cuatro razas guatemaltecas: Nal Tel de Altura, Serrano, Negro de Chimaltenango y Quicheño) [8]. Estos maíces son estudiados y catalogados por la CONABIO (tomando en cuenta diferentes aspectos como distribución, características físicas, entre otras), quienes clasificaron las 64 razas en siete grandes grupos, descritos a continuación [6, 8].

3.1. Grupo cónico o razas de las partes altas del centro de México

La característica principal de estos maíces es la presencia de forma cónica o piramidal en sus mazorcas [19]. Este grupo posee similitud en sus mazorcas, las cuales son de forma cónica, con hileras de granos que van desde 14 a 20 granos con una anchura de 8 mm y textura variable que puede ser harinosa hasta palomera. También este grupo presenta reducción en las ramas de espiga, un sistema de raíces débiles, hojas caídas y hojas vellosas que presentan compuestos como las antocianinas, las cuales son responsables de su coloración característica [20]. Estos maíces constituyen la base de la producción agrícola del centro del país, empleados principalmente para la producción de pozoles, tortilla, tamales, palomitas, asi como antojitos de distintos tipos. De igual manera, los subproductos de este grupo de maíces tienen una importancia económica debido a su uso como la hoja para tamal y para forraje [8]. En la Figura 1 se muestran de manera gráfica las distintas razas pertenecientes a este grupo.

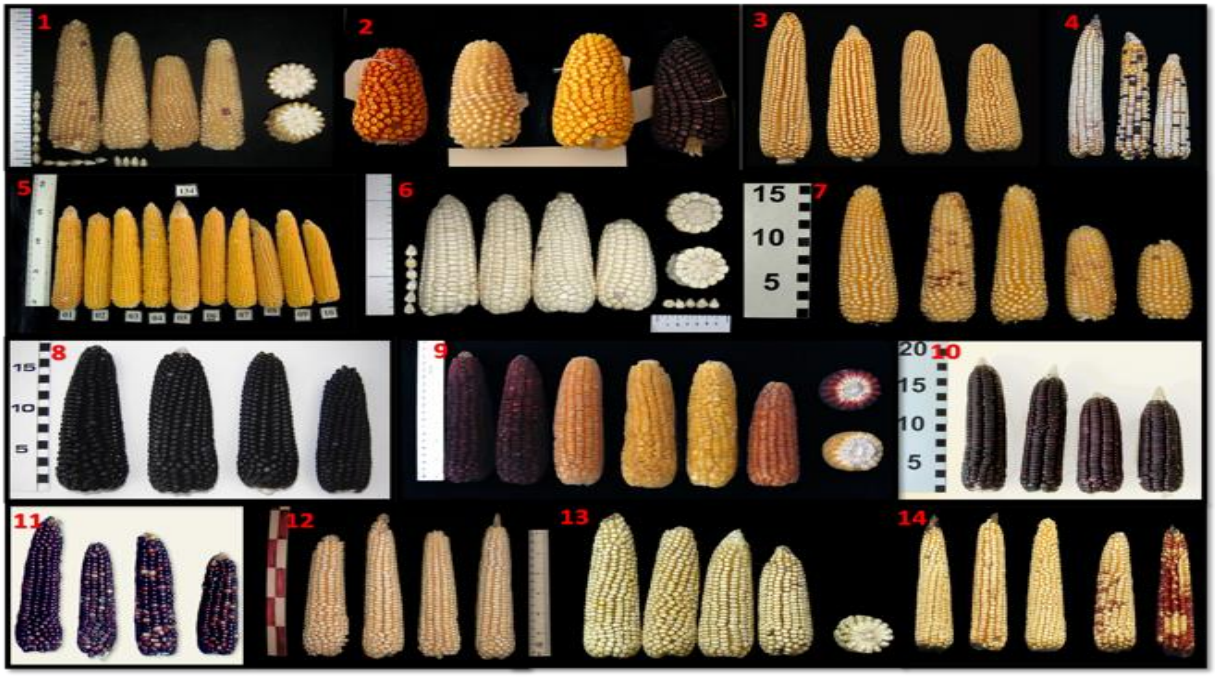


Figura 1. Grupo Cónico o razas de las partes altas del centro de México; Palomero Toluqueño (1), Arrocillo (2), Chalqueño (3), Mushito (4), Palomero de Chihuahua (5), Cacahuacintle (6), Cónico (7), Elotes Cónicos (8), Dulce (9), Negrito (10), Palomero de Jalisco (11), Mushito de Michoacán (12), Cónico Norteño (13), Uruapeño (14) y Mixteco. Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.2. Grupo sierra de Chihuahua o razas de las partes altas del norte de México

Los maíces de este grupo (Figura 2) presentan adaptaciones de crecimiento a zonas altas templadas, similares al cónico, aunque contrasta en rasgos morfológicos de mazorca y planta [19]. La textura de este grupo es variada siendo dura para la raza de Apachito y Cristalino de Chihuahua y de textura harinosa para las razas Gordo y Azul [20].



Figura 2. Grupo Sierra de Chihuahua o razas de las partes altas del norte de México; Azul (1), Cristalino de Chihuahua (2), Mountain Yellow (Amarillo de Montaña) (3), Gordo (4), Serrano de Jalisco (5) y Apachito (6). Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.3. Grupo de maíces de ocho hileras o razas del occidente de México

En este grupo las razas de maíz (Figura 3) varían con mazorcas de tamaño pequeño (Bolita) hasta gigante (Jala). Se caracterizan por ser plantas de 200 a 250 cm de altura, con mazorcas que contienen de 8 a 12 hileras de granos, con una anchura de 10 a 12 mm para los granos y mazorcas largas de 18 a 22 cm [20]. Se cultivan principalmente para su consumo como elotes y también se utilizan en diversos platillos típicos y antojitos regionales [8].



Figura 3. Grupos de maíces de Ocho hileras o razas del occidente de México; Tablilla de Ocho (1), Elotes occidentales (2), Bofo (3), Jala (4), Tabloncillo (5), Ancho (6), Tabloncillo Perla (7), Onaveño (8), Harinoso de Ocho (9), Blando (10), Bolita (11) y Zamora (12). Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.4. Grupo chapalote

En este grupo, las razas de maíz tienen mazorcas alargadas, y los granos pueden presentar diferentes texturas, desde harinosa hasta rugosa, debido a su alto contenido de sacarosa. (Figura 4) [8, 20]. Este grupo de maíces presentan diferentes usos como lo son: Chapalote para obtener palomitas, pinole y ponteduro; el Reventador para producir palomitas; el Elotero de Sinaloa para la preparación de elotes; y El Dulcillo del Noroeste se utiliza para hacer pinole y elotes o esquites [21].

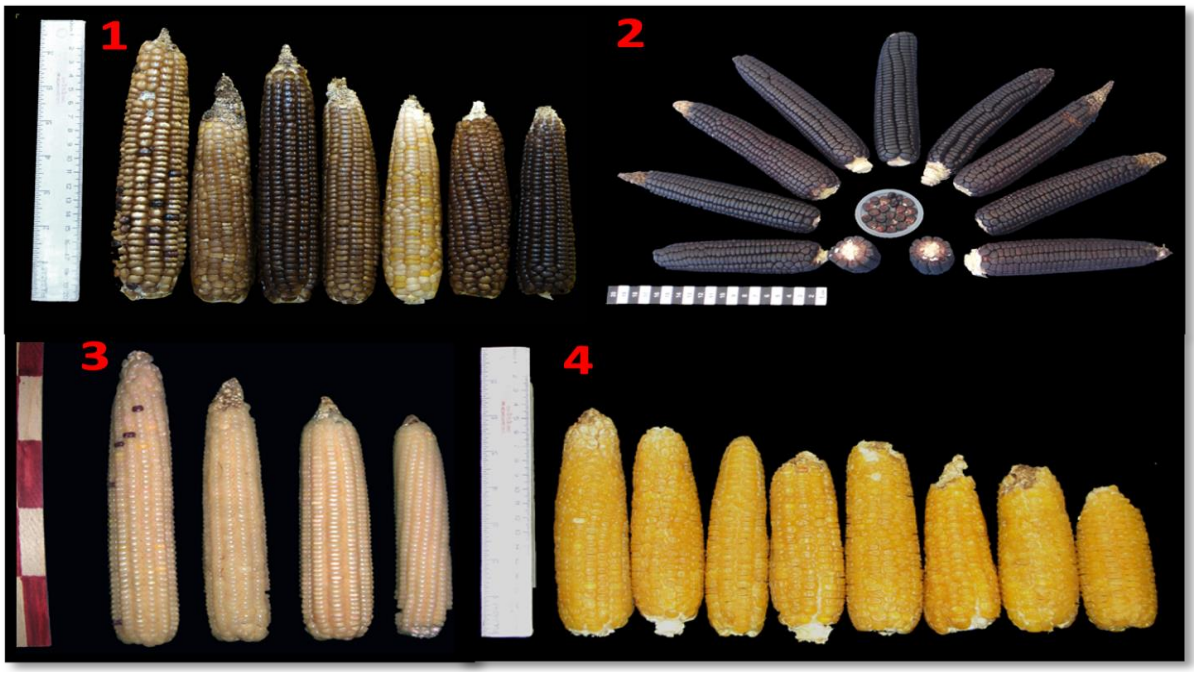


Figura 4. Grupo Chapalote; Chapalote (1), Elotero de Sinaloa (2), Reventador (3) y Dulcillo del Noroeste (4). Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.5. Grupo de maíces tropicales precoces o de maduración temprana

Este grupo de maíz (Figura 5), se cultivan principalmente en terrenos del trópico seco y regiones semiáridas, adaptadas a limitados regímenes de lluvia, lo que les confiere un ciclo de maduración corta o temprana con gran adaptabilidad. El uso de este grupo de maices es variado desde totopos, hasta la preparación de atoles [8].

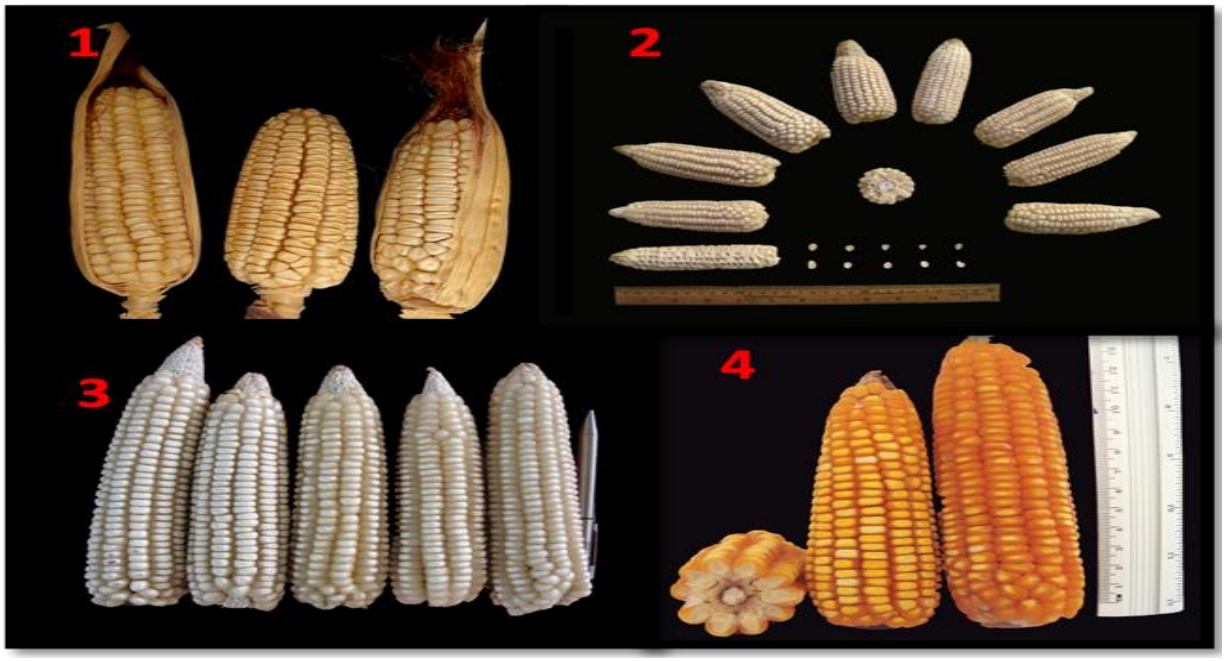


Figura 5. Razas de maíces tropicales precoces o de maduración temprana; Zapalote Chico (1), Ratón (2), Conejo (3) y Nal-Tel (4). Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.6. Grupo de maíces dentados tropicales

Este grupo se caracteriza por tener plantas de altura entre 250 - 320 cm, mazorcas de medianas a largas (12 - 20 cm), con 12 a 16 hileras de granos dentados y un endospermo suave a medio duro. Las razas de este grupo (Figura 6) y sus derivados se utilizan para los programas de mejoramiento genético en sectores públicos y privados en centros especializados a nivel mundial [8, 20].

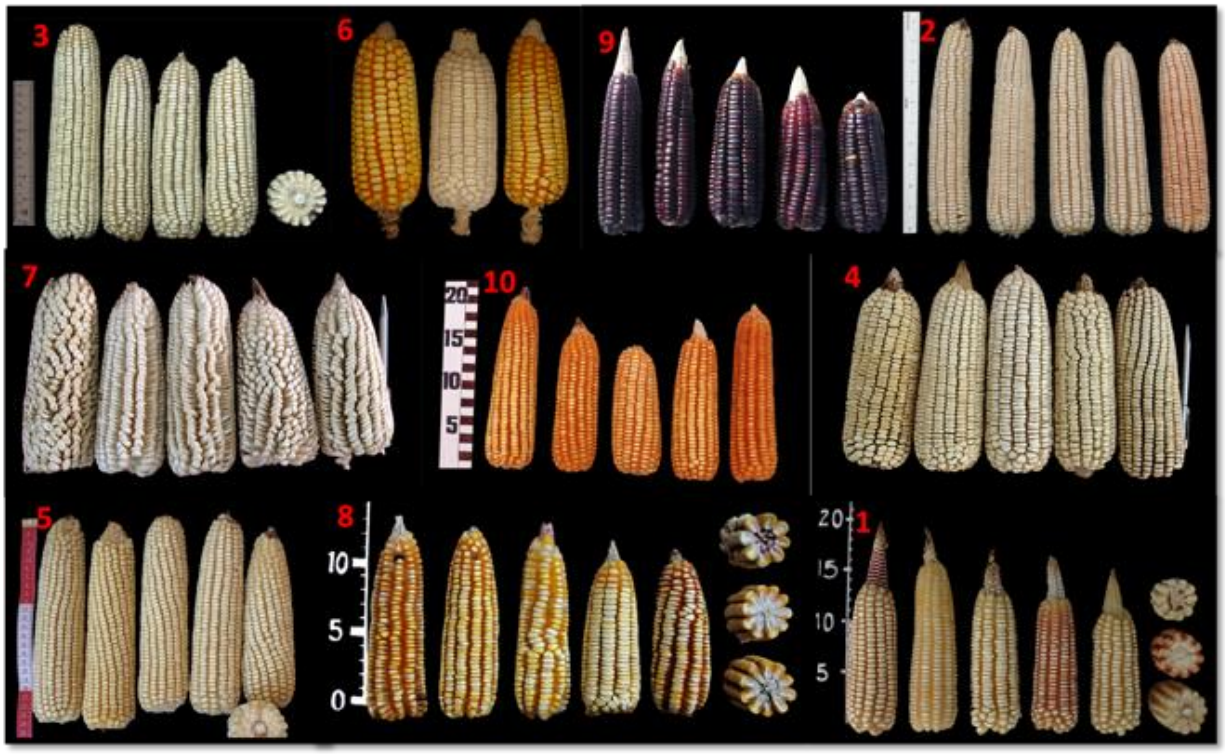


Figura 6. Grupo de maíces dentados tropicales; Tuxpeño Norteño (1), Zapalote Grande (2), Chiquito (3), Tuxpeño (4), Pepitilla (5), Cubano Amarillo (Cuban Flint) (6), Vandeño (7), Celaya (8), Nal-Tel de Altura (9), Tepecintle (10) y Choapaneco (11). Adaptada a partir de CONABIO [8].

3.7. Grupo de maíces de maduración tardía

Este grupo de maíces comprende a plantas de maduración muy tardías (Figura 7), con un período de floración de 95 - 115 días, mazorcas largas (de 18 - 22 cm), hileras de 12 -14 granos, 8 - 11 mm de ancho, 9 - 13 mm de longitud y una textura en el endospermo de suave a medio duro [8, 22].

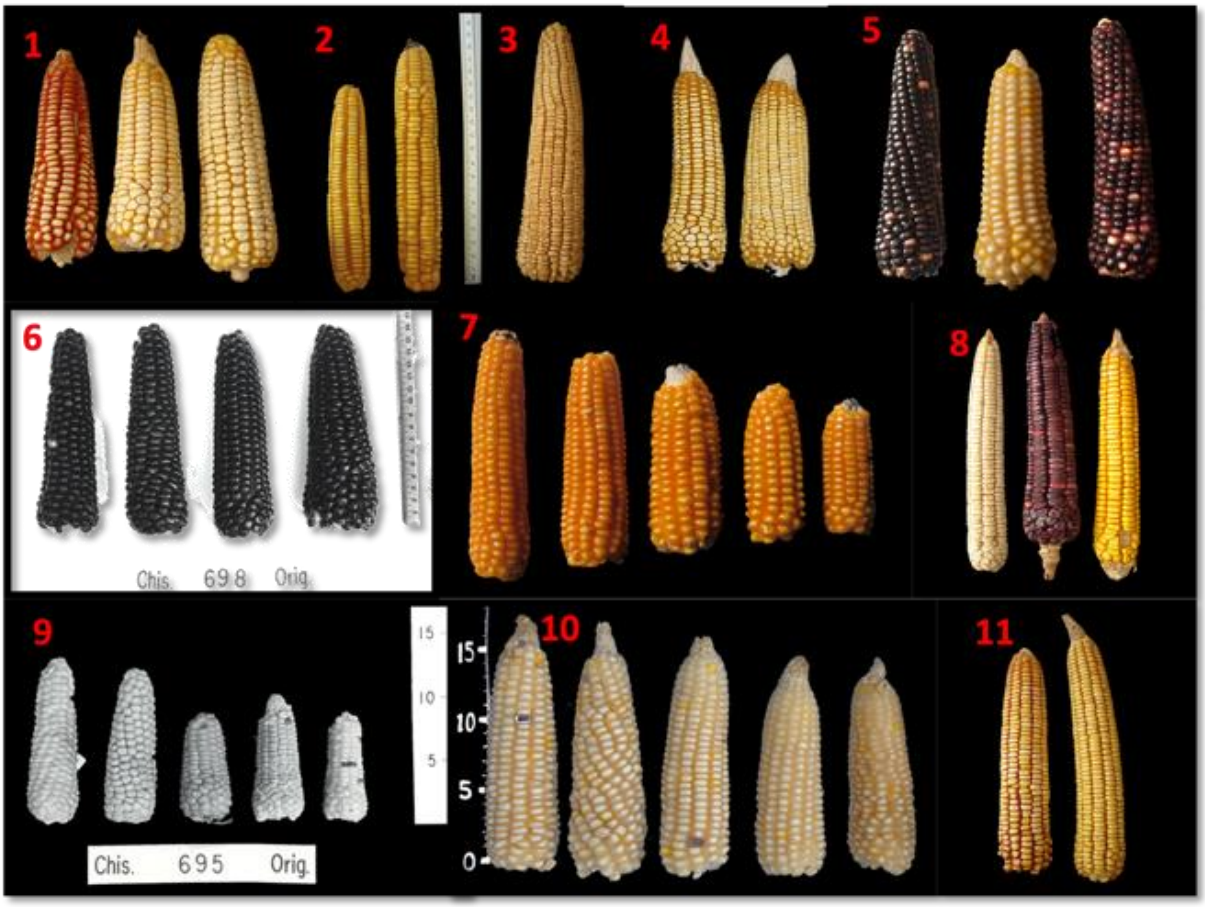


Figura 7. Grupo de maíces de maduración tardía; Motozinteco (1), Dzit-Bacal (2), Coscomatepec (3), Tehua (4), Olotón (5), Negro Chimaltenango (6), Serrano Mixe (7), Olotillo (8), Quicheño (9), Serrano (10), Comiteco (11) y Mixeño. Adaptada a partir de CONABIO [8].

4. Composición fisicoquímica y propiedades nutricionales de la planta de maíz

El maíz se conforma por tallo, semilla o grano de maíz, olote, hojas, espiga y estigmas (pelo de elote) de maíz (Figura 8). El grano del maíz es el alimento ideal para consumo humano, ya sea de forma directa o indirecta, como materia prima y fuente de carbohidratos para bebidas artesanales, tortillas, harinas, almidón y jarabe. Asimismo, se utiliza como forraje en la alimentación del ganado, ya que posee más aporte energético comparado con otros cereales, por lo que se le conoce como el rey de los granos [23]. La parte de la planta, después de retirar el grano del maíz o mazorca, se corta y trocea para forraje, como prácticas comunes en productores de recursos económicos limitados [24]. Adicionalmente, algunas partes de la planta se utilizan por la industria farmacéutica o como medicina alternativa, como el tallo y hojas verdes (para curar heridas frescas), o bebida de maíz con jengibre y cáscara de piña (para tratar el dolor en riñones causado por nefrolitos), así como una bebida elaborada con los pelos de elote (para tratar la cistitis) [25].

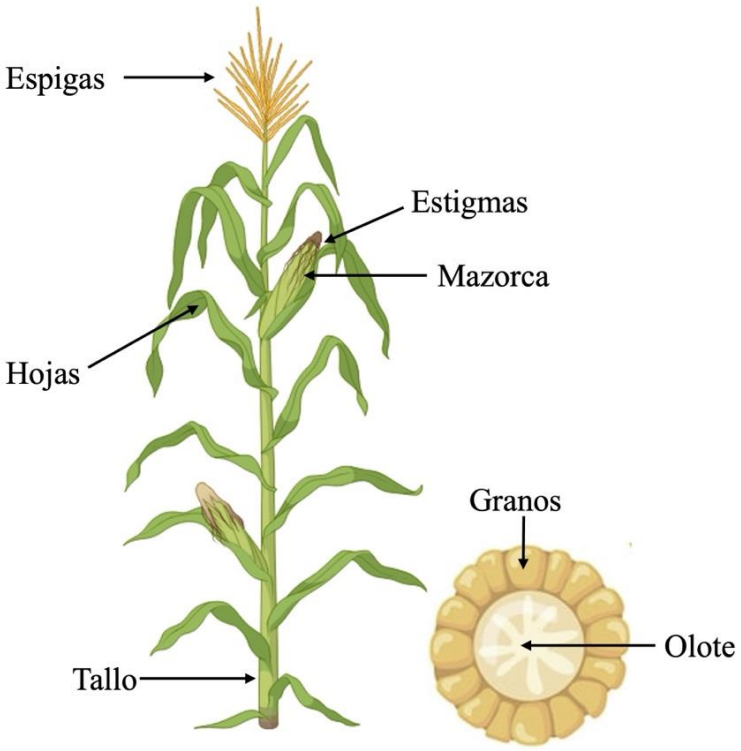


Figura 8. Partes de la planta de maíz.

4.1. Grano de maíz

El grano de maíz es la parte que más se consume como alimento, ya que aporta una gran nutrientes [26], debido a esto el grano de maíz contiene un gran valor nutrimental. Este cereal contiene; carbohidratos, fibra, aceite, cenizas, proteínas, vitaminas (vitamina C, E, K, B1 (tiamina), B2 (niacina), B3 (riboflavina), B5 (ácido pantoténico), B6 (piridoxina)), diversos minerales como fósforo, sodio, potasio, calcio, azufre, cobre, magnesio, hierro y selenio. También se puede encontrar ácido fólico [26, 27]. Representa aproximadamente el 42% del peso en seco de la planta [4], compuesto principalmente por tres partes: la pericarpio, el endospermo y el germen. La pericarpio o también llamado cascarilla, es la piel o cubierta del grano y este ocupa el 5% del peso, constituida por celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo así una buena fuente de fibra cruda [28]. El endospermo funciona como la principal reserva energética del grano y ocupa hasta el 83% aproximadamente del peso del grano, se compone de un 90% de almidón, un 9% de proteína y pequeñas cantidades de aceites, minerales y otros elementos. El germen, por su parte, contiene grandes cantidades de energía las cuales se encuentran en forma de aceite, la cual tiene la función de nutrir a la planta cuando comienza el período de crecimiento, así como otros compuestos (lípidos, proteínas y sales minerales) necesarias durante el proceso de germinación y desarrollo de la planta [29, 30].

El grano de maíz presenta diversidad de colores (de blanco a amarillo, rojo, azul o morado), atribuidos a la presencia de fitoquímicos (Tabla 1) como los carotenoides, antocianinas, flavonoides, fitoesteroles y algunos derivados de ácido hidroxicinámico [26, 31-34].

Tabla 1. Diferentes compuestos identificados en diferentes tipos de maíz.

Compuesto fenólico	Tipo de maíz	Efecto a la salud	Referencias
Ácido ferúlico	Amarillo, morado, blanco	Antioxidante, antidiabético, antiinflamatorio y antidepresivo	[32, 34-37]
Ácido p-cumárico	Amarillo, azul, rojo y blanco	Antioxidante, antimicrobiano, anti-inflamatorio y analgésico	
Antocianinas (cianidina, pelargonidina, peonidina)	Azul, morado	Antioxidante, antiinflamatorio, anticancerígeno, antidiabético	
Catequina	Morado, azul, blanco	Antioxidante, antiinflamatorio, anticancerígeno, antiviral	

4.2. Planta (rastrojo)

El rastrojo comprende el subproducto obtenido después de la cosecha del maíz. Comprende tallos (28%), espigas (12%), y hojas que cubren la mazorca (38%), pueden ser frescas o secas. Se usa como forraje para alimentar ganado, o bien para la generación de biocombustibles y otros productos químicos de valor agregado (glucano, xilano, ácidos orgánicos) [38]. El rastrojo representa alrededor del 53% del cultivo total de la planta. Su composición química difiere de acuerdo a la fracción (tallo, espiga u hoja), pero consiste en una mezcla heterogénea de celulosa, hemicelulosa y lignina [38], así como proteína, fibra, fosforo, y calcio [39]. En el rastrojo se han identificado diversos compuestos fitoquímicos como ácidos fenólicos, flavonoides y antocianinas [35, 40, 41]. Las variaciones en su composición se atribuyen a la madurez del cultivo y la estación del año, así como a los cambios año con año respecto a las condiciones climáticas que son imposibles de controlar, como la escasez de agua o las olas de calor [42].

4.3. Olote

El olote de maíz es cilíndrico y duro, al cual se encuentra unido el grano del maíz por medio de la punta del grano [38]. Contiene celulosa, hemicelulosa y lignina (50, 33 y 16 %, respectivamente), en el olote se encuentra mayor cantidad de celulosa y menor contenido de lignina, en comparación con el rastrojo de maíz, contiene alto contenido de fibra (mayor al 70%) y bajo contenido de proteínas (de 2 al 5 %) [43, 44]. También se ha reportado la presencia de almidón, pectina y grasa [45], y compuestos bioactivos [46]. Al igual que el grano de maíz, esta parte de la planta es rica en compuestos fenólicos de gran interés para la industria, como los ácidos fenólicos (acido cafeico, ácido p-cumárico, ácido ferúlico), antocianinas (cianidina, pelargonidina, peonidina y derivados) y flavonoides (apigenina y luteolina) [35, 47-49]. El olote es usado principalmente para alimento para ganado, y para la producción de bioetanol [50], bioaceite, biogás y biocarbon [51], así como sustrato para la producción de diversas enzimas [52].

5. Efecto del procesamiento sobre la composición fitoquímica y nutrimental de maíz

Es conocido que los fitoquímicos se ven afectados por el procesamiento de los alimentos, específicamente con los tratamientos térmicos y los cambios de acidez [53]. Si bien, el maíz tiene diversos usos, en algunos países de América Latina se usa para la elaboración de tortillas, este proceso involucra un proceso de nixtamalización.

La nixtamalización es un proceso termo-alcalino, que involucra el cocimiento del grano del maíz en agua y cal ($Ca(OH)_2$), el proceso continúa con lavados, molienda de maíz y mezclado con agua, lo que permite formar una masa, a la cual se le puede dar diversos usos para la elaboración de alimentos típicos y populares [54]. El proceso de nixtamalización genera un agua residual rica en polisacáridos distintos al almidón (hemicelulosa y celulosa), proteínas, azúcares, vitaminas y fitoquímicos ricos en fenoles y carotenoides [55]. Asimismo, se ha reportado diversos efectos del proceso de nixtamalización sobre el contenido de compuestos antioxidantes en el grano de maíz. Gutiérrez-Uribe *et al*. [56] observaron un incremento del 20% en los fenoles libres, y una reducción de hasta 65% para fenoles ligados en diferentes granos de maíz (blanco, rojo, amarillo, alto en proteína y azul) sometidos a nixtamalización hasta obtener la masa. En granos de maíz blanco, amarillo, azul y rojo, se redujo significativamente el contenido de fenoles totales, después de someterlos al proceso de nixtamalización [57]. Sin embargo, cuando el maíz dulce fue sometido a un proceso térmico, se presentó una mayor actividad antioxidante, así como un incremento en el contenido de ácido ferúlico y fenoles totales, esto debido al rompimiento de la pared celular del maíz, donde están alojados los compuestos fenolicos [58].

Existen estudios donde se utilizan procesos biotecnológicos como la fermentación en medio sólido (FMS), la cual consiste en la acción de un microorganismo (hongos, levaduras o bacteria) para aumentar el contenido de compuestos fenólicos en alimentos. Se ha reportado el uso de diferentes microorganismos en el proceso de FMS en granos de maíz, logrando incrementos en el contenido fenólico y la capacidad antioxidante de 50-290 % y 125-150 %, respectivamente [59-61].

6. Perspectivas y conclusiones

El maíz ha sido un alimento importante durante siglos, y en los últimos años ha crecido el interés por sus beneficios para la salud. Investigaciones recientes han descubierto que no solo el grano, sino también sus otras partes, como el olote, los pelos de elote y el rastrojo, contienen compuestos buenos para la salud, llamados compuestos fenólicos. Estos incluyen ácidos fenólicos, antocianinas y flavonoides, que ofrecen propiedades protectoras, y lo sorprendente es que muchos de estos compuestos siguen siendo útiles incluso después de procesar el maíz.

Estos hallazgos han llevado a más estudios para encontrar maneras de usar toda la planta de maíz. Aunque sabemos que el maíz morado tiene muchos de estos compuestos beneficiosos, necesitamos hacer más comparaciones con otras variedades de maíz. También es importante mencionar que hay pocos estudios sobre cómo obtener estos compuestos saludables de las partes sobrantes del maíz usando biotecnología, como la fermentación en estado sólido. Este método tiene mucho potencial porque puede convertir los residuos del maíz en productos valiosos con la ayuda de microorganismos.

7. Bibliografía

1. Kato T.Á., Mapes C., Mera L.M., Serratos J.A., y Bye R.A. (2009). *Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica*. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF. Vol. 116.

2. Matsuoka Y. (2005). "Origin Matters: Lessons from the Search for the Wild Ancestor of Maize*". Breeding Science*. 55(4): p. 383-390 10.1270/jsbbs.55.383.

3. Wilkes H.G. (1985). *Teosinte: The closest relative of maize*. Maydica. Vol. 30. 209-223.

4. FAO. (1993). *El maíz en la nutricion humana*. FAO, Roma (Italia).

5. IGC. (2024) *IGC, Grains and Oilseeds Index (GOI)*. 2024 [Recuperado 2024]; Disponible en: https://www.igc.int/en/markets/marketinfo-goi.aspx.

6. SIAP. (2024) *Avance de Siembras y Cosechas*. 2024 [Recuperado 2024]; Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/.

7. Ruiz Corral J.A., Durán Puga N., Sánchez González J.d.J., Ron Parra J., González Eguiarte D.R., Holland J.B., y Medina García G. (2008). "Climatic Adaptation and Ecological Descriptors of 42 Mexican Maize Races*". Crop Science*. 48(4): p. 1502-1512 https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0518.

8. CONABIO. (2020) *Razas de maíz en México*. 2020 [Recuperado el 12, 2023]; Disponible en: https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz.

9. CONABIO. (2022) *Polinización*. 2022 09/2022 [Recuperado el 11, 2024]; Disponible en: https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose/polinizacion.

10. Goodman M.M.yBrown W.L. (1988). *Races of Corn*. in *Corn and Corn Improvement*. p. 33-79.

11. Villa T.C.C., Maxted N., Scholten M., y Ford-Lloyd B. (2005). "Defining and identifying crop landraces*". Plant Genetic Resources*. 3(3): p. 373-384 10.1079/PGR200591.

12. Yamasaki M., Wright S.I., y McMullen M.D. (2007). "Genomic Screening for Artificial Selection during Domestication and Improvement in Maize*". Annals of Botany*. 100(5): p. 967-973 10.1093/aob/mcm173.

13. Walden D.B. (1978). *Maize breeding and genetics*.

14. Chakradhar T., Hindu V., y Reddy P.S. (2017). "Genomic-based-breeding tools for tropical maize improvement*". Genetica*. 145(6): p. 525-539 10.1007/s10709-017-9981-y.

15. Duvick D.N., Smith J., y Cooper M. (2004). "Long-term selection in a commercial hybrid maize breeding program*". Plant breeding reviews*. 24(2): p. 109-152

16. Cooper M., Gho C., Leafgren R., Tang T., y Messina C. (2014). "Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product". *Journal of Experimental Botany*. 65(21): p. 6191-6204 10.1093/jxb/eru064.

17. Perales R H.R. (2010). "Maíz, riqueza de México". *Ciencias*. 92(092)

18. Goodman M.M.yBird R.M. (1977). "The Races of maize iv: tentative grouping of 219 Latin American races". *Economic Botany*. 31(2): p. 204-221 10.1007/BF02866591.

19. Sanchez G J., Goodman M., y Stuber C. (2000). "Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico". *Economic Botany*. 54(1)

20. van Heerwaarden J., Doebley J., Briggs W.H., Glaubitz J.C., Goodman M.M., de Jesus Sanchez Gonzalez J., y Ross-Ibarra J. (2011). "Genetic signals of origin, spread, and introgression in a large sample of maize landraces". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108(3): p. 1088-1092 10.1073/pnas.1013011108.

21. de la O-Olán M., Santacruz-Varela A., Sangerman-Jarquín D.M., Gámez-Vázquez A.J., Arellano-Vázquez J.L., Valadez-Bustos M.G., y Avila Perches M.A. (2018). "Estandarización del método de reventado para la evaluación experimental del maíz palomero". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(7): p. 1471-1471 10.29312/remexca.v9i7.1675.

22. Sánchez G.J.J. (2011). Diversidad del Maíz y el Teocintle. Informe preparado para el proyecto: "Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México". *CONABIO*. Manuscrito.

23. Zaremanesh H., Nasiri B., y Amiri A. (2017). "The effect of vermicompost biological fertilizer on corn yield". *Journal of Materials and Environmental Science*. 8: p. 154-159

24. Martínez-Loperena R., Castelan-Ortega O., Ronquillo M., y Estrada-Flores J. (2011). "Determinación de la calidad nutritiva, fermentación In Vitro y metabolitos secundarios en arvenses y rastrojo de maíz utilizados para la alimentación del ganado lechero". *Tropical and subtropical agroecosystems*. 14: p. 525-536

25. Veljković V.B., Biberdžić M.O., Banković-Ilić I.B., Djalović I.G., Tasić M.B., Nježić Z.B., y Stamenković O.S. (2018). "Biodiesel production from corn oil: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91: p. 531-548 https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.024.

26. Rouf Shah T., Prasad K., y Kumar P. (2016). "Maize—A potential source of human nutrition and health: A review". *Cogent Food & Agriculture*. 2(1): p. 1166995 10.1080/23311932.2016.1166995.

27. Shah P.yModi H. (2015). "Comparative study of DPPH, ABTS and FRAP assays for determination of antioxidant activity". *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol*. 3(6): p. 636-641

28. Kaushal M., Sharma R., Vaidya D., Gupta A., Saini H.K., Anand A., Thakur C., Verma A., Thakur M., Priyanka, y Kc D. (2023). "Maize: an underexploited golden cereal crop". *Cereal Research Communications*. 51(1): p. 3-14 10.1007/s42976-022-00280-3.

29. Cuevas Mejía J.d.J. (2014). "Maíz: Alimento fundamental en las tradiciones y costumbres mexicanas". *PASOS*. 12: p. 425-432 https://doi.org/10.25145/j.pasos.2014.12.030.

30. Gwirtz J.A.yGarcia-Casal M.N. (2014). "Processing maize flour and corn meal food products". *Ann N Y Acad Sci*. 1312(1): p. 66-75 10.1111/nyas.12299.

31. González-Muñoz A., Quesille-Villalobos A.M., Fuentealba C., Shetty K., y Gálvez Ranilla L. (2013). "Potential of Chilean Native Corn (*Zea mays* L.) Accessions as Natural Sources of Phenolic Antioxidants and in Vitro Bioactivity for Hyperglycemia and Hypertension Management". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61(46): p. 10995-11007 10.1021/jf403237p.

32. Ramos-Escudero F., Muñoz A.M., Alvarado-Ortíz C., Alvarado Á., y Yáñez J.A. (2012). "Purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds profile and its assessment as an agent against oxidative stress in isolated mouse organs". *J Med Food*. 15(2): p. 206-15 10.1089/jmf.2010.0342.

33. Rodríguez-Salinas P.A., Zavala-García F., Urías-Orona V., Muy-Rangel D., Heredia J.B., y Niño-Medina G. (2020). "Chromatic, Nutritional and Nutraceutical Properties of Pigmented Native Maize (*Zea mays* L.) Genotypes from the Northeast of Mexico". *Arabian Journal for Science and Engineering*. 45(1): p. 95-112 10.1007/s13369-019-04086-0.

34. Damián-Medina K., Salinas-Moreno Y., Milenkovic D., Figueroa-Yáñez L., Marino-Marmolejo E., Higuera-Ciapara I., Vallejo-Cardona A., y Lugo-Cervantes E. (2020). "In silico analysis of antidiabetic potential of phenolic compounds from blue corn (*Zea mays* L.) and black bean (*Phaseolus vulgaris* L.)". *Heliyon*. 6(3)

35. Vazquez-Olivo G., López-Martínez L.X., Contreras-Angulo L., y Heredia J.B. (2019). "Antioxidant Capacity of Lignin and Phenolic Compounds from Corn Stover". *Waste and Biomass Valorization*. 10(1): p. 95-102 10.1007/s12649-017-0028-5.

36. Hernández M., Ventura J., Castro C., Boone V., Rojas R., Ascacio-Valdés J., y Martínez-Ávila G. UPLC-ESI-QTOF-MS2-Based Identification and Antioxidant Activity Assessment of Phenolic Compounds from Red Corn Cob (*Zea mays* L.). Molecules, 2018. 23, 1425 DOI: 10.3390/molecules23061425.

37. Del Pozo-Insfran D., Brenes C.H., Serna Saldivar S.O., y Talcott S.T. (2006). "Polyphenolic and antioxidant content of white and blue corn (*Zea mays* L.) products". *Food Research International*. 39(6): p. 696-703 https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.01.014.

38. Ruan Z., Wang X., Liu Y., y Liao W. (2019). *Chapter 3 - Corn*. in *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*, Z. Pan, R. Zhang, and S. Zicari, Editors., Academic Press. p. 59-72.

39. Li H.Y., Xu L., Liu W.J., Fang M.Q., y Wang N. (2014). "Assessment of the nutritive value of whole corn stover and its morphological fractions*"*. *Asian-Australas J Anim Sci*. 27(2): p. 194-200 10.5713/ajas.2013.13446.

40. Jung Y.-J., Park J.-H., Seo K.-H., Shrestha S., Lee D.-S., Kim Y.-C., Kang H.-C., Kim J., y Baek N.-I. (2014). "Phenolic compounds from the stems of Zea mays and their pharmacological activity*"*. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*. 57(3): p. 379-385 10.1007/s13765-014-4104-2.

41. Liu J., Wang C., Wang Z., Zhang C., Lu S., y Liu J. (2011). "The antioxidant and free-radical scavenging activities of extract and fractions from corn silk (*Zea mays* L.) and related flavone glycosides*"*. *Food Chemistry*. 126(1): p. 261-269 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.014.

42. Weiss N.D., Farmer J.D., y Schell D.J. (2010). "Impact of corn stover composition on hemicellulose conversion during dilute acid pretreatment and enzymatic cellulose digestibility of the pretreated solids*"*. *Bioresource Technology*. 101(2): p. 674-678 https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.082.

43. Wachirapakorn C., Pilachai K., Wanapat M., Pakdee P., y Cherdthong A. (2016). "Effect of ground corn cobs as a fiber source in total mixed ration on feed intake, milk yield and milk composition in tropical lactating crossbred Holstein cows*"*. *Animal Nutrition*. 2(4): p. 334-338 https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.08.007.

44. Córdoba J.A., Salcedo E., Rodríguez R., Zamora J.F., Manríquez R., Contreras H., Robledo J., y Delgado E. (2013). "Caracterización y valoración química del olote: degradación hidrotérmica bajo condiciones subcríticas*"*. *Revista latinoamericana de química*. 41(3): p. 171-184

45. Kaliyan N.yMorey R.V. (2010). "Densification characteristics of corn cobs*"*. *Fuel Processing Technology*. 91(5): p. 559-565 https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.01.001.

46. Gullón P., Eibes G., Lorenzo J.M., Pérez-Rodríguez N., Lú-Chau T.A., y Gullón B. (2020). "Green sustainable process to revalorize purple corn cobs within a biorefinery frame: Co-production of bioactive extracts*"*. *Science of The Total Environment*. 709: p. 136236 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136236.

47. Hernández M., Ventura J., Castro C., Boone V., Rojas R., Ascacio-Valdés J., y Martínez-Ávila G. (2018). "UPLC-ESI-QTOF-MS2-Based Identification and Antioxidant Activity Assessment of Phenolic Compounds from Red Corn Cob (*Zea*

mays L.)*". Molecules*. 23(6) 10.3390/molecules23061425.

48. Lao F.yGiusti M.M. (2018). "Extraction of purple corn (*Zea mays* L.) cob pigments and phenolic compounds using food-friendly solvents*". Journal of Cereal Science*. 80: p. 87-93 https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.01.001.

49. Fernandez-Aulis F., Hernandez-Vazquez L., Aguilar-Osorio G., Arrieta-Baez D., y Navarro-Ocana A. (2019). "Extraction and Identification of Anthocyanins in Corn Cob and Corn Husk from Cacahuacintle Maize*". Journal of Food Science*. 84(5): p. 954-962 https://doi.org/10.1111/1750-3841.14589.

50. Sewsynker-Sukai Y.yGueguim Kana E.B. (2018). "Simultaneous saccharification and bioethanol production from corn cobs: Process optimization and kinetic studies*". Bioresour Technol*. 262: p. 32-41 10.1016/j.biortech.2018.04.056.

51. Duan D., Dong X., Wang Q., Zhang Y., Ruan R., Wang Y., y Lei H. (2021). "Production of renewable phenols from corn cob using catalytic pyrolysis over self-derived activated carbons prepared with torrefaction pretreatment and chemical activation*". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 623: p. 126507 https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126507.

52. Ismail S.A., Nour S.A., y Hassan A.A. (2022). "Valorization of corn cobs for xylanase production by *Aspergillus flavus* AW1 and its application in the production of antioxidant oligosaccharides and removal of food stain*". Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 41: p. 102311 https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102311.

53. Acosta-Estrada B.A., Gutiérrez-Uribe J.A., y Serna-Saldivar S.O. (2019). *Chapter 14 - Minor Constituents and Phytochemicals of the Kernel*. in *Corn (Third Edition)*, S.O. Serna-Saldivar, Editor., AACC International Press: Oxford. p. 369-403.

54. Ramírez-Jiménez A.K., Rangel-Hernández J., Morales-Sánchez E., Loarca-Piña G., y Gaytán-Martínez M. (2019). "Changes on the phytochemicals profile of instant corn flours obtained by traditional nixtamalization and ohmic heating process*". Food Chemistry*. 276: p. 57-62 https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.166.

55. Vacio-Muro K.J., Lozano-Álvarez J.A., Sánchez-González M.N., Chávez Vela N.A., Torres-Ramírez E., y Jáuregui-Rincón J. (2020). "Remoción de contaminantes del nejayote con alginato y quitosano*". Revista internacional de contaminación ambiental*. 36(3): p. 497-515

56. Gutiérrez-Uribe J.A., Rojas-García C., García-Lara S., y Serna-Saldivar S.O. (2010). "Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of maize kernels processed into masa for tortillas*". Journal of Cereal Science*. 52(3): p. 410-416

https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.07.003.

57. de la Parra C., Serna Saldivar S.O., y Liu R.H. (2007). "Effect of Processing on the Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Corn for Production of Masa, Tortillas, and Tortilla Chips". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55(10): p. 4177-4183 10.1021/jf063487p.

58. Dewanto V., Wu X., y Liu R.H. (2002). "Processed Sweet Corn Has Higher Antioxidant Activity". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 50(17): p. 4959-4964 10.1021/jf0255937.

59. Ramírez-Esparza U., Ochoa-Reyes E., Baeza-Jiménez R., y Buenrostro-Figueroa J.J. (2023). "Efecto de la fermentación en medio sólido sobre el contenido de fenoles totales y la capacidad antioxidante del maíz". *CienciaUAT*. 18(2): p. 136-144 10.29059/cienciauat.v18i2.1801.

60. Sánchez Magaña L., Reyes Moreno C., Jorge M.-C., Mora Rochin S., León-López L., Gutiérrez Dorado R., y Cuevas-Rodriguez E.-O. (2019). "Influence of solid-state bioconversion by *Rhizopus oligosporus* on antioxidant activity and phenolic compounds Of Maize (*Zea mays* L.)". *Agrociencia*. 53: p. 45-57

61. 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*. 142: p. 111003 https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111003.