

CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL ALMIDÓN EXTRAÍDO DE GENOTIPOS DIVERSOS DE MAÍZ AZUL

GERMÁN FERNANDO GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, VÍCTOR MANUEL RODRÍGUEZ-ROMERO, LUIS EDSON RAMÍREZ-ARRIAGA, LUIS FERNANDO CEJA-TORRES, PATRICIA VÁZQUEZ-LOZANO, MARTÍN FILIBERTO GARCÍA-MENDOZA Y LUIS JORGE CORZO-RÍOS

RESUMEN

El almidón se utiliza ampliamente en la producción industrial de alimentos debido a los beneficios que otorga en sabor, consistencia y vida de anaquel. En el presente estudio se cuantificaron los contenidos de almidón, proteína del extracto almidonoso, índice de solubilidad y capacidad de hinchamiento del gránulo, así como el tamaño y morfología de los gránulos, en el almidón extraído del grano de 18 genotipos de maíz azul (criollos, líneas e híbridos simples y triples). El almidón se extrajo mediante molienda húmeda. El contenido de almidón

fluctuó entre 40 y 68%, y el de proteína, entre 0,6 y 1,9%. Los gránulos de almidón presentaron formas poliédricas y ovaladas, con tamaños de 10 a 30 μm . Por su valor de proteína asociada al gránulo (0,62), el híbrido [(L9×L4)×L11] tuvo almidón de alta calidad. Los genotipos que presentaron mayor poder de hinchamiento fueron Cocotitlán I (8,50), L11 (8,15), L10×L8 (8,59) y [(L10×L8)×L3] (8,44g agua/g almidón); por tanto, sus almidones podrían adicionarse a productos cárnicos, embutidos, jaleas o quesos, dada su propiedad de retener humedad.

Introducción

 El grano de maíz constituye un componente esencial en la dieta de la población mexicana, y su consumo se ha extendido a Europa y África. En la actualidad, se reconoce

como el cultivo de mayor relevancia a nivel mundial, tanto por su volumen de producción como por la superficie cultivada. Esta importancia ha impulsado investigaciones orientadas a usos alternativos al consumo tradicional, incluyendo propuestas de mezclas con otros ingredientes típicos de México (Sánchez-Villa *et al.*, 2020).

El cultivo del maíz se adapta a una amplia diversidad de tipos de suelos y condiciones climáticas; su plasticidad genética se manifiesta en múltiples características, tales como las formas y tamaños de las mazorcas, así como en la gran variedad de texturas y colores de los granos (blancos, rojos, negros,

PALABRAS CLAVE / Gránulo de Almidón / Hinchamiento del Gránulo de Almidón / Maíz Azul /

Recibido: 29/10/2024. Modificado: 21/04/2025. Aceptado: 23/04/2025.

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández. Doctor en Ciencias en Genética Vegetal, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. México. Profesor-Investigador, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, México.

Víctor Manuel Rodríguez-Romero. Doctor Ciencias en Bioprocesos. Profesor-Investigador. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI), Instituto Politécnico Nacional. México.

Luis Edson Ramírez-Arriaga. Ingeniero Biotecnólogo. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. México.

Luis Fernando Ceja-Torres. Doctor en Ciencias en Fitopatología. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. México. Profesor-Investigador. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán, Instituto Politécnico Nacional, México.

Patricia Vázquez-Lozano. Maestra en Ciencias con Especialidad en Alimentos, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Profesora-Investigadora. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, México.

Martín Filiberto García-Mendoza. Doctor en Educación. Profesor-Investigador. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, México.

Luis Jorge Corzo-Ríos (Autor de correspondencia). Doctor en Ciencias Químicas y Bioquímicas. Profesor-Investigador. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, México. Dirección: Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología. Av. Acueducto s/n, La Laguna Ticomán. C. P. 07340. Ciudad de México, México. e-mail: lcorzo@ipn.mx.

azules, rosados, etc.) (Vidal *et al.*, 2017; SIAP, 2018).

En el grano de maíz, además de la variación en el color del endospermo o de la aleurona, existe diversidad en cuanto a tamaño, densidad, dureza y composición química, cuyas características tienen un origen genético modulado por el ambiente (prácticas agrícolas, clima y tipo de suelo), con una interacción significativa entre ambos factores (Castañeda-Sánchez, 2011).

El maíz azul se distingue por su elevado contenido de pigmentos con actividad antioxidante y una mayor concentración de proteínas en comparación con variedades de grano blanco o amarillo, lo que le confiere un alto valor agregado (Castañeda-Sánchez, 2011; Figueroa-Cárdenas *et al.*, 2013).

Un factor determinante en el maíz es su estructura genética, que puede corresponder a criollos regionales, líneas endogámicas, variedades sintéticas o híbridos, ya que esta estructura define la expresión y estabilidad de los caracteres de interés en la progenie (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018; Delgado, 2017), así como el manejo genético y tecnológico requerido. Los maíces criollos presentan una alta variabilidad genética, de la cual se seleccionan individuos sobresalientes que, mediante autofecundación, dan origen a líneas con variación reducida pero altamente selectiva, utilizadas en cruzamientos dirigidos para formar híbridos que combinan de manera óptima las características de las líneas parentales (Díaz *et al.*, 2007; Ledesma-Miramontes *et al.*, 2015), o para el desarrollo de variedades sintéticas (Arellano-Vázquez *et al.*, 2017; Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2023).

El componente mayoritario del grano de maíz es el almidón (73%), polisacárido ampliamente utilizado en la industria alimentaria por sus propiedades funcionales como espesante, estabilizador coloidal, gelificante, agente de retención de agua y adhesivo, contribuyendo a mejorar la textura, volumen, consistencia, humedad y vida útil de los alimentos procesados (Paraginski *et al.*, 2014). Debido a su alta disponibilidad y bajo costo, el almidón de maíz es uno de los más estudiados a nivel mundial (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2018).

Las propiedades físico-químicas del almidón dependen de la proporción amilosa/amilopectina, del peso molecular, de la estructura y tamaño de los gránulos, así como de los componentes no amiláceos presentes en el grano (lípidos y proteínas). Por este motivo, resulta de interés caracterizar almidones

provenientes de fuentes no convencionales, con el fin de identificar propiedades útiles en procesos industriales (Quinto *et al.*, 2015), como es el caso del almidón extraído del maíz azul.

En el endospermo de los cereales, los gránulos de almidón se encuentran rodeados de cuerpos proteicos, por lo que es necesario romper los enlaces proteicos para lograr una extracción eficiente del almidón. Estos gránulos son insolubles en agua, pero tienen la capacidad de absorberla de forma reversible, es decir, se expanden (hinchon) al hidratarse y se contraen al perder humedad. El grado de turgencia de los gránulos depende de su tamaño, de la proporción de amilosa/amilopectina, y del contenido de proteínas y lípidos (Debet y Gidley, 2006).

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del genotipo de maíz (criollo, línea endogámica, híbrido simple o híbrido triple) sobre las características físico-químicas del almidón extraído, tales como contenido de almidón y de proteínas asociadas, solubilidad, tamaño, morfología y capacidad de expansión de los gránulos. Se considera que los resultados obtenidos podrían proporcionar a la industria alimentaria fundamentos científicos y tecnológicos para incorporar almidón de maíz azul en sus procesos productivos.

Materiales y Métodos

Material biológico

Se emplearon cuatro grupos de maíces con grano azul desarrollados por el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz Azul del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias: A) Variedades criollas Cocotitlán I (Ameca 05), Puebla 479, Cocotitlán II (Zoto 06), Cuijingo y Oaxaca 711; B) Líneas endogámicas L3, L4, L8, L10, L11 y L12; C) Híbridos simples L11×L12, L9×L4 y L10×L8 y D) Híbridos trilineales [(L11×L12)×L10], [(L9×L4)×L11], [(L10×L8)×L3] y [(L11×L12)×L3)].

Extracción de almidón

La extracción de almidón se realizó de acuerdo con lo reportado por Bello-Pérez *et al.* (2010), Yang *et al.* (2021) y Corzo-Ríos *et al.* (2014). Para cada genotipo, se pesaron 25g de granos, los cuales fueron molidos en dos etapas, primero con un procesador comercial (Sunbeam) y luego con un molino de café

(Krupps). La harina obtenida se dispersó en etanol al 70% (proporción 1:6) y se agitó durante 60 minutos a 60°C. Posteriormente, la mezcla se tamizó con mallas #50 y #100, se recuperó el residuo sólido y se lavó con etanol al 70% (proporción 1:2), repitiendo el tamizado; este proceso se repitió por triplicado.

Finalmente, el residuo sólido se sometió a molienda húmeda con agua (proporción 1:12) y se tamizó nuevamente. El residuo obtenido se lavó con agua (proporción 1:6), se tamizó y el efluente recuperado se centrifugó a 2200G durante 15min en una centrífuga (HERMLE, Z 206 A). El sobrenadante se descartó y la pastilla (almidón) se recuperó y se secó a 60°C durante 24h en estufa (Ecoshel, 9053 A).

Purificación de almidón

Para la purificación, se siguió el método descrito por Utrilla-Coello *et al.* (2009). Se preparó una solución de bisulfito de sodio al 1%, la cual se mezcló con el almidón (proporción 1:10), se agitó a temperatura ambiente (20 ±2°C) durante 30min y se incubó por igual tiempo. Posteriormente, se decantó la solución y la fracción obtenida se lavó con agua destilada (proporción 1:10), se agitó durante 5min, se dejó sedimentar por 20min y se decantó nuevamente. Este procedimiento se repitió por triplicado. Finalmente, el almidón purificado fue centrifugado a 2200G durante 15min y secado a 60°C por 24h en horno de convección forzada (Ecoshel, 9053 A).

Determinación de proteína

El contenido de proteína se determinó mediante el método de Bradford (1976), utilizando albúmina de suero bovino para la curva estándar y lectura a 595nm. Se preparó una suspensión al 1% (p/v) de almidón, se agitó durante 15min a temperatura ambiente (2 ±2°C), y se tomó una alícuota de 0,25ml a la que se añadieron 0,75ml de reactivo de Bradford (Sigma-Aldrich). La mezcla se incubó durante 5min y la absorbancia se midió a 595nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s) utilizando celdas de cuarzo. La concentración de proteína se obtuvo por interpolación en la curva estándar.

Tamaño del gránulo de almidón

Para determinar el tamaño de los gránulos de almidón, se preparó una suspensión al 1% (p/v), se agitó durante 15min a temperatura ambiente y se depositó una gota sobre una regla de

referencia. La muestra se observó con un microscopio (ZEISS, Primo Star), con lente de 10×, y se fotografió con una cámara digital (Hayear). Las imágenes fueron analizadas mediante el programa ImageJ, con el cual se midió el diámetro de 150 gránulos.

Índice de solubilidad en agua y capacidad de expansión o hinchamiento

Para determinar la solubilidad en agua y la capacidad de hinchamiento, se preparó una suspensión de almidón al 1% (p/v) con un volumen total de 40ml, la cual fue colocada en un tubo de 50ml previamente tarado. El tubo se colocó en baño María a temperatura constante (50, 60, 70 y 80°C) y se agitó durante 30 minutos. Posteriormente, la suspensión se dejó enfriar y fue centrifugada a 2200G durante 15 minutos en una centrífuga (HERMLE, Z206A). El sobrenadante se decantó y se pesó el tubo con los gránulos de almidón hinchados.

La capacidad de hinchamiento se calculó con base en la relación entre el peso de la muestra residual y la materia seca inicial de almidón (g/g de almidón, en base seca). Los sobrenadantes fueron secados a 110°C hasta alcanzar peso constante, y estos residuos se utilizaron para evaluar la solubilidad del almidón (g/g de almidón, en base seca) (Wang *et al.*, 2017).

Contenido de almidón total

El contenido total de almidón fue determinado utilizando el Megazyme Total Starch Assay Kit (AA/AMG) (Megazyme International Ireland, Wicklow A98 YV29), conforme a los protocolos 996.11 (AOAC, 2012) y 76-13.01 (AACC, 1995).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y a pruebas de comparación de medias (p ≤0,05).

Resultados y Discusión

Extracción de almidón

Entre los criollos regionales, Cocotitlán II presentó los valores más altos o intermedios de rendimiento de extracción de almidón (56,98%) y contenido de almidón (54,18%), así como el valor más bajo de proteína en la fracción almidonosa (Tabla I). En contraste, Oaxaca 711 mostró los valores más bajos en estas variables (40,81%, 37,52% y 0,91%, respectivamente). En el grupo de líneas, L4 se destacó por su alto rendimiento y contenido de almidón, así como por su mayor concentración de proteína asociada al polisacárido, superando incluso a todos los genotipos evaluados en estas tres variables.

Los híbridos simples y trilineales presentaron valores intermedios entre los criollos y las líneas, lo que podría atribuirse a su variabilidad genética intrínseca, pero no a efectos heteróticos (Gaytán y Pérez, 2010), ya que no se

TABLA I
 RENDIMIENTO DE EXTRACCIÓN, CONTENIDO DE ALMIDÓN Y CONTENIDO DE PROTEÍNA EN LA FRACCIÓN ALMIDONOSA DE 18 GENOTIPOS DE MAÍZ AZUL (CRIOLLOS, LÍNEAS E HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES)

Criollos	Rendimiento (%)	Almidón (g/100g)	Proteína (en fracción almidonosa)
Cocotitlán I	53,67	36,79±0,36 ^g	1,43±0,06 ^b
Puebla 479	54,54	55,76±1,24 ^d	1,58±0,02 ^{ab}
Cocotitlán II	56,98	54,18±0,64 ^d	1,11±0,05 ^b
Cuijingo	52,58	36,73±0,28 ^g	1,53±0,01 ^b
Oaxaca 711	40,81	37,52±0,17 ^g	0,91±0,11 ^b
Líneas endogámicas			
L3	47,78	58,38±0,96 ^c	1,51±0,05 ^b
L4	64,11	70,75±1,50 ^a	1,89±0,09 ^a
L8	61,17	61,76±1,46 ^b	1,74±0,03 ^a
L10	53,74	51,53±1,19 ^d	1,57±0,01 ^{ab}
L11	57,75	63,20±1,31 ^b	1,43±0,02 ^b
L12	51,20	58,31±0,39 ^c	0,93±0,01 ^b
Híbridos simples			
L11xL12	50,47	64,33±2,33 ^b	1,80±0,01 ^a
L9xL4	61,81	57,82±1,26 ^c	1,68±0,01 ^a
L10xL8	60,01	35,73±0,32 ^h	1,06±0,01 ^b
Híbridos trilineales			
[(L11xL12)xL10]	53,05	35,77±0,16 ^h	1,56±0,01 ^{ab}
[(L9xL4)xL11]	57,32	60,44±0,89 ^b	0,62±0,06 ^b
[(L10xL8)xL3]	62,07	50,38±0,79 ^d	1,66±0,02 ^a
[(L11xL12)xL3])	67,20	40,75±0,13 ^f	1,70±0,06 ^a

Medias con letra distinta son estadísticamente diferentes, n=3 (Tukey p≤0,05).

observó superioridad de los híbridos respecto a las líneas. Es posible que hayan influido variaciones distintas a las genéticas, como las derivadas de las operaciones unitarias durante el proceso de extracción (Singh *et al.*, 2003). Solo el híbrido trilineal [(L11×L12)×L3] registró una eficiencia de extracción superior (67,20%), lo cual lo posiciona como el genotipo más adecuado como fuente de almidón. Los valores de rendimiento de extracción obtenidos en este estudio fueron superiores a los reportados por Bustillos-Rodríguez *et al.* (2019) para maíz azul (16,90%) utilizando protocolos a pequeña escala, y similares al 66% descrito por Kent (1987) con el método industrial de mollienda húmeda.

Por otra parte, el contenido de almidón osciló entre 40 y 67%, cifras semejantes a las reportadas por Agama-Acevedo *et al.* (2005), quienes informaron 66,2% para maíz blanco y 73,5% para maíz azul. Sin embargo, estos valores resultan menores en comparación con estudios posteriores de los mismos autores (Agama-Acevedo *et al.*, 2011), que reportaron 78,5% y 82,9% para las razas tabloncillo y chalqueño, respectivamente. Estas variaciones pueden estar relacionadas con el tipo de endospermo del grano y la proporción amilosa/amilopectina (Singh *et al.*, 2003).

El contenido de almidón está influenciado por la textura del grano. La mayoría de las líneas estudiadas fueron semicristalinas (L3, L8 y L10), y solo L4 fue clasificada como harinosa (Arellano-Vázquez *et al.*, 2023).

En cuanto al contenido de proteína en la fracción almidonosa (Tabla I), se observaron variaciones entre genotipos de 0,6 a 1,9%, valores superiores al 0,38% informado por Silvana (2012). Los criollos regionales presentaron concentraciones entre 0,9 y 1,5%, similares a las reportadas por Aparicio-Saguilán *et al.* (2007) para variedades de polinización libre, y considerablemente mayores que las observadas en quinua (0,22 a 0,31%) (Quinto *et al.*, 2015). Estas proteínas desempeñan un papel en la biosíntesis del almidón.

Las variedades criollas, así como los híbridos simples y trilineales, presentaron una concentración de proteína en el almidón superior a 0,9%, por lo que, según la NMX-F-382-1986, no pueden clasificarse como almidones de alta calidad (límite máximo de 0,8%). En cambio, el híbrido trilineal [(L9×L4)×L11] presentó 0,62% de proteína, valor que le confiere calidad aceptable para aplicaciones industriales. Ninguno de los genotipos evaluados cumplió con la norma de la FDA para la

producción de jarabes con alto contenido de glucosa, que establece un límite máximo de 0,35% de proteína en el almidón, debido a que concentraciones elevadas de proteína favorecen las reacciones de Maillard (Zajac, 1989).

De acuerdo con la NMX-FF-034-1995, el contenido de proteína constituye un parámetro relevante para determinar la viabilidad del almidón como insumo para la industria (Aparicio-Saguilán *et al.*, 2007).

Caracterización morfológica

Todos los genotipos evaluados exhibieron gránulos de almidón con formas poliédricas y ovaladas (Figura 1), y tamaños variables entre 10 y 30µm (Tabla II), superiores a los reportados para el almidón de maíz azul de las razas Chalqueño (16,2µm) y Tabloncillo (18,6µm) (Agama-Acevedo *et al.*, 2011).

La literatura científica ofrece abundante información sobre el tamaño del gránulo de almidón (Medina y Salas, 2008; Bustillos-Rodríguez *et al.*, 2019), y coincide en que este parámetro depende del genotipo (Agama-Acevedo *et al.*, 2011). Esta relación explica la

diversidad morfológica observada en los gránulos de almidón de los genotipos analizados (Tabla II, Figura 1), dado que presentan diferencias en su genealogía. En función de lo anterior, resulta pertinente investigar las propiedades del almidón asociadas al tamaño de grano, tales como composición química, actividad enzimática, cristalinidad, gelatinización, formación de pasta, hinchamiento y solubilidad (Lindeboom y Chang, 2004; Medina y Salas, 2008).

Índice de solubilidad en agua y capacidad de hinchamiento

Los genotipos presentaron un incremento notable en la solubilidad del almidón a partir de los 70°C (Tabla III), comportamiento que concuerda con lo reportado por Aparicio-Saguilán *et al.* (2007), quienes indicaron que los gránulos modifican su estructura al dilatarse, lo que propicia la lixiviación de amilosa y permite la solubilización del polisacárido.

La expansión del gránulo de almidón, también conocida como capacidad de hinchamiento (Tabla IV), mostró un comportamiento similar al de la solubilización (Tabla III): los genotipos

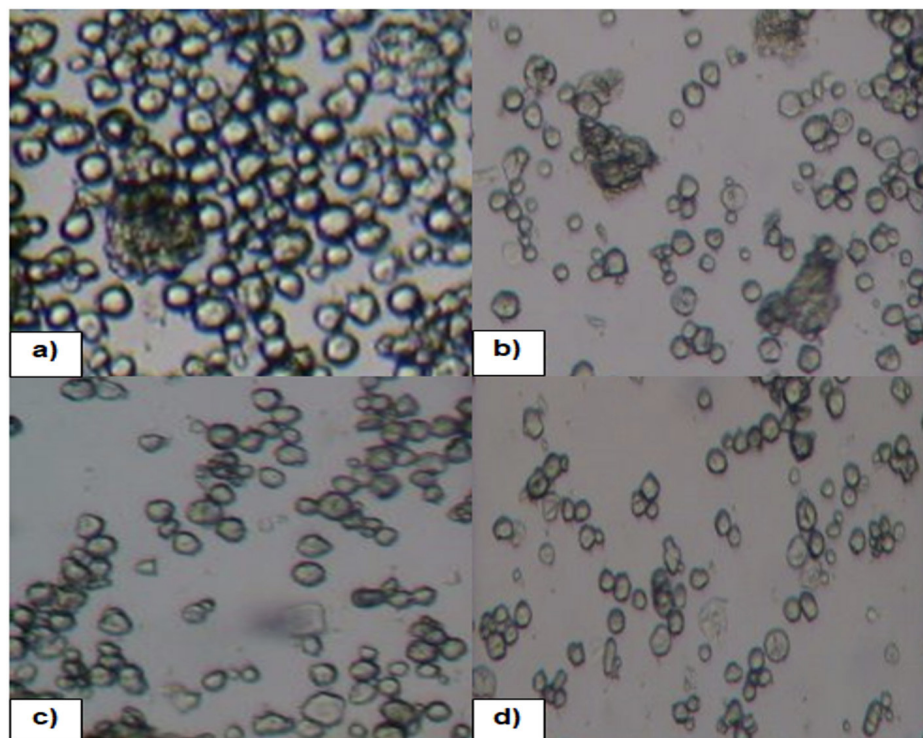


Figura 1. Gránulos de almidón (10 X): a) Cocotitlán I (grano harinoso) b) L3 (grano semicristalino), c) Híbrido simple (L9×L4) (grano semicristalino), d) Híbrido triple [(L11×L12)×L3] (harinoso × semicristalino).

TABLA II
TAMAÑO DE GRÁNULO DE ALMIDÓN DE 18 GENOTIPOS DE MAÍZ AZUL
(CRIOLLOS, LÍNEAS E HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES)

Criollos	Tamaño de gránulo (μm)
Cocotitlán I	19,55 ±2,60 ^{abc}
Puebla 479	17,89 ±0,09 ^{bc}
Cocotitlán II	16,48 ±1,38 ^{bc}
Cuijingo	17,89 ±1,48 ^{bc}
Oaxaca 711	20,01 ±1,04 ^{abc}
Líneas endogámicas	
L3	20,10 ±3,54 ^{abc}
L4	21,43 ±0,12 ^{ab}
L8	19,90 ±0,60 ^{abc}
L10	23,47 ± 0,96 ^a
L11	20,88 ±0,20 ^{ab}
L12	20,33 ±0,98 ^{abc}
Híbridos simples	
L11×L12	21,55 ±0,44 ^{ab}
L9×L4	20,39 ±0,80 ^{abc}
L10×L8	22,93 ±0,75 ^a
Híbridos trilineales	
[(L11×L12)×L10]	20,18 ±1,01 ^{abc}
[(L9×L4)×L11]	20,90 ±0,68 ^{ab}
[(L10×L8)×L3]	23,21 ±0,81 ^a
[(L11×L12)×L3]	20,40 ±0,81 ^{ab}

Medias con letra distinta fueron estadísticamente diferentes, n=3 (Tukey p≤0,05).

experimentaron una expansión limitada por debajo de 70°C, y una expansión significativa por encima de esta temperatura. Esta respuesta es indicativa de temperaturas de gelatinización elevadas en todos los genotipos evaluados.

La expansión de los gránulos inducida por el aumento de temperatura se atribuye a la ruptura de los puentes de hidrógeno intermoleculares en las zonas amorfas, lo que permite una absorción irreversible y progresiva de agua (Corzo-Ríos *et al.*, 2014).

Los genotipos con mayor poder de hinchamiento a 70°C fueron Cocotitlán I (8,50), L11 (8,15), L10×L8 (8,59) y [(L10×L8)×L3] (8,44g agua/g almidón). Gracias a su capacidad de retención de humedad, el almidón de estos materiales genéticos podría incorporarse a productos cárnicos, embutidos, jaleas o quesos, donde se requiere preservar la frescura durante su vida de anaquel.

El criollo Oaxaca 711 presentó el menor contenido de proteína en el gránulo de almidón (0,91%) (Tabla I), pero registró una de las mayores

capacidades de expansión (Tabla IV). El mismo comportamiento se observó en el híbrido triple [(L9×L4)×L11], que presentó el contenido proteico más bajo de su grupo (0,62%).

La presencia de amilopectina en los gránulos aumenta la capacidad de hinchamiento, mientras que la presencia de proteínas la reduce. Una mayor proporción de amilopectina da lugar a geles más elásticos; sin embargo, las condiciones de gelatinización y gelificación también influyen significativamente en esta propiedad. Los almidones que se hinchan con rapidez al calentarse suelen contener menos proteínas, en contraste con aquellos cuya expansión es más lenta, ya que las proteínas remanentes reducen la hidratación del gránulo y elevan las temperaturas de gelatinización (Altay y Gunasekaran, 2006; Debet y Gidley, 2006). Además, factores como el contenido de amilosa y lípidos, así como la estructura morfológica del gránulo, también tienen un efecto importante (Singh *et al.*, 2003; Debet y Gidley, 2006).

Conclusiones

El contenido de almidón osciló entre 40 y 68%, mientras que el de proteína varió entre 0,6 y 1,9%. Los gránulos de almidón exhibieron formas poliédricas y ovaladas, con tamaños comprendidos entre 10 y 30μm. Con base en su contenido de proteína asociada al gránulo (0,62%), el híbrido [(L9×L4)×L11] fue clasificado como almidón de alta calidad. Los genotipos que presentaron mayor capacidad de hinchamiento fueron Cocotitlán I (8,50), L11 (8,15), L10×L8 (8,59) y [(L10×L8)×L3] (8,44g agua/g almidón); por tanto, los almidones obtenidos de estos materiales genéticos podrían incorporarse a productos cárnicos, embutidos, jaleas o quesos, debido a su capacidad para retener humedad.

REFERENCIAS

- AACC International (1995) *Approved methods of analysis Method 76-13.01*. Total starch assay procedure (Megazyme Amyloglucosidase/α-Amylase method). 11th ed. AACCI, St. Paul, Minnesota, EE.UU.
- Agama-Acevedo E, de la Rosa A, Méndez-Montealvo G, Bello-Pérez LA (2008) Physicochemical and biochemical characterization of starch granules isolated of pigmented maize hybrids. *Starch/Stärke* 60: 433-441.
- Agama-Acevedo E, Ottenhof MA, Farhat IA, Paredes-López O, Ortiz-Cereceres J, Bello-Pérez LA (2005) Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia* 39: 419-429.
- Agama-Acevedo E, Salinas-Moreno Y, Pacheco-Vargas G, Bello-Pérez LA (2011) Características Físicas y Químicas de Dos Razas de Maíz Azul: Morfología del Almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 317-29.
- Altay F, Sundaram G (2006) Influence of drying temperature, water content, and heating rate on gelatinization of corn starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54: 4235-4245. <http://doi.org/10.1021/jf0527089>.
- AOAC International (2012) *Official methods of analysis of AOAC international Methods 991.43*. 19th ed. AOAC International, Gaithersburg, Maryland, EE.UU.
- Aparicio-Saguilán A, Méndez-Montealvo G, Solorza-Feria J, Bello-Pérez LA (2007) Thermal and viscoelastic properties of starch gels from maize varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 1243: 1078-1086. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2461>.
- Arellano-Vázquez JL, Gutiérrez-Hernández GF, Ceja-Torres LF, Flores-Gómez E, García-Ramírez E, Quiroz-Figueroa FR and Vázquez-Lozano P (2023) Combining ability and reciprocal effects for the yield of elite blue corn lines from the Central Highlands of Mexico. *Plants* 12: 3861. <https://doi.org/10.3390/plants12223861>.
- Arellano-Vázquez JL, Vázquez-Ramos JM, García-Ramírez E, Gómez y-Gómez YM, Gutiérrez-Hernández GF (2017) Monitoreo de la calidad proteica de maíz O2 (*Zea Mays* L.) en líneas endogámicas y su progenie F1 Y F2. *Agrociencia* 51: 425-36.

TABLA III
ÍNDICE DE SOLUBILIDAD EN AGUA DE 18 GENOTIPOS DE MAÍZ AZUL (CRIOLLOS, LÍNEAS E HÍBRIDOS
SIMPLES Y TRILINEALES)

Criollos	50°C	60°C	70°C	80°C
Cocotitlán I	1,94 ±0,86 ^a	2,07 ±0,78 ^{ab}	5,86 ±0,56 ^{ab}	13,57 ±1,17 ^a
Puebla 479	0,99 ±0,14 ^b	1,61 ±0,35 ^b	4,71 ±1,01 ^b	8,38 ±1,52 ^b
Cocotitlán II	0,84 ±0,27 ^b	1,15 ±0,24 ^c	4,83 ±0,38 ^{ab}	10,31 ±0,80 ^{ab}
Cuijingo	1,29 ±0,20 ^{ab}	3,25 ±0,33 ^a	5,89 ±1,81 ^{ab}	10,38 ±2,93 ^{ab}
Oaxaca 711	1,58 ±0,36 ^{ab}	1,56 ±0,43 ^b	2,27 ±0,82 ^b	14,52 ±0,89 ^a
Líneas endogámicas				
L3	1,55 ±0,18 ^{ab}	2,67 ±0,53 ^{ab}	7,90 ±0,21 ^a	6,79 ±0,86 ^b
L4	0,51 ±0,16 ^b	0,80 ±0,12 ^c	4,80 ±0,52 ^b	12,67 ±0,69 ^{ab}
L8	1,39 ±0,47 ^{ab}	2,46 ±0,81 ^{ab}	6,18 ±0,83 ^b	16,48 ±2,84 ^a
L10	2,53 ±1,09 ^a	3,00 ±0,28 ^a	6,33 ±1,05 ^{ab}	13,00 ±2,36 ^a
L11	1,77 ±0,75 ^{ab}	1,88 ±0,67 ^a	7,72 ±1,15 ^a	6,39 ±3,25 ^b
L12	1,85 ±0,34 ^a	2,22 ±0,07 ^{ab}	3,17 ±0,85 ^b	11,59 ±0,28 ^{ab}
Híbridos simples				
L11×L12	1,49 ±0,12 ^{ab}	2,23 ±0,13 ^{ab}	8,07 ±0,86 ^a	11,84 ±1,09 ^{ab}
L9×L4	2,01 ±0,15 ^a	2,63 ±0,70 ^{ab}	7,57 ±0,43 ^{ab}	11,02 ±2,34 ^{ab}
L10×L8	1,46 ±0,12 ^{ab}	2,27 ±0,28 ^{ab}	7,25 ±0,80 ^{ab}	8,29 ±0,57 ^b
Híbridos triples				
[(L11×L12)×L10]	1,54 ±0,16 ^{ab}	2,34 ±0,67 ^{ab}	8,62 ±1,85 ^a	6,62 ±1,36 ^b
[(L9×L4)×L11]	1,29 ±0,02 ^{ab}	1,44 ±0,05 ^c	3,46 ±0,38 ^b	7,01 ±1,19 ^b
[(L10×L8)×L3]	1,56 ±0,13 ^{ab}	2,85 ±0,37 ^{ab}	7,26 ±0,83 ^{ab}	9,82 ±0,71 ^{ab}
[(L11×L12)×L3]	1,01 ±0,32 ^b	2,34 ±0,22 ^{ab}	3,46 ±0,38 ^b	4,63 ±2,26 ^b

Medias con letra distinta son estadísticamente diferentes, n=3 (Tukey p≤0,05).

TABLA IV
CAPACIDAD DE EXPANSIÓN (HINCHAMIENTO) DE 18 GENOTIPOS DE MAÍZ AZUL (CRIOLLOS, LÍNEAS E
HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES)

Criollos	50°C	60°C	70°C	80°C
Cocotitlán I	3,79 ±0,28 ^{ab}	5,17 ±0,51 ^{abc}	8,50 ±0,75 ^a	9,25 ±1,08 ^b
Puebla 479	2,29 ±0,15 ^c	4,47 ±0,25 ^{bc}	7,44 ±0,62 ^{ab}	8,46 ±0,06 ^b
Cocotitlán II	4,10 ±0,89 ^{ab}	5,46 ±0,59 ^{abc}	8,38 ±0,35 ^a	9,41 ±0,51 ^{ab}
Cuijingo	3,47 ±0,20 ^{ab}	5,94 ±0,60 ^{abc}	7,88 ±0,71 ^{ab}	9,06 ±1,05 ^b
Oaxaca 711	5,60 ±0,34 ^a	6,96 ±0,59 ^a	7,84 ±0,18 ^{ab}	7,99 ±0,27 ^b
Líneas endogámicas				
L3	3,49 ±0,04 ^{ab}	4,70 ±0,80 ^{bc}	7,78 ±0,04 ^{ab}	10,46 ±0,29 ^{ab}
L4	3,21 ±0,11 ^b	4,18 ±0,31 ^c	7,76 ±0,26 ^{ab}	9,79 ±0,43 ^{ab}
L8	3,31 ±0,12 ^b	4,37 ±0,22 ^{bc}	7,71 ±0,44 ^{ab}	9,16 ±0,92 ^b
L10	3,97 ±0,09 ^{ab}	5,12 ±0,60 ^{ab}	7,75 ±0,26 ^{ab}	8,97 ±0,62 ^b
L11	4,06 ±0,42 ^a	4,87 ±0,73 ^{bc}	8,15 ±0,63 ^a	11,65 ±1,50 ^a
L12	4,00 ±0,50 ^a	6,21 ±0,21 ^{ab}	6,74 ±0,30 ^b	7,65 ±0,17 ^b
Híbridos simples				
L11×L12	3,66 ±0,09 ^{ab}	4,61 ±0,19 ^{bc}	7,99 ±0,28 ^{ab}	9,39 ±0,22 ^{ab}
L9×L4	3,16 ±0,07 ^{ab}	5,39 ±0,58 ^{ab}	8,53 ±0,34 ^a	10,94 ±0,65 ^a
L10×L8	3,43 ±0,06 ^{ab}	4,97 ±0,39 ^{ab}	8,59 ±0,36 ^a	10,75 ±0,19 ^a
Híbridos triples				
[(L11×L12)×L10]	3,28±0,02 ^{ab}	4,64±0,67 ^{bc}	8,30±0,33 ^a	11,61±0,45 ^a
[(L9×L4)×L11]	5,72±0,16 ^a	6,14±0,28 ^{ab}	7,49±0,13 ^{ab}	7,69±0,29 ^a
[(L10×L8)×L3]	3,33±0,12 ^{ab}	5,00±0,29 ^{ab}	8,45±0,24 ^a	10,81±0,44 ^b
[(L11×L12)×L3]	3,19±0,03 ^{ab}	5,16±0,52 ^{ab}	8,31±0,09 ^a	11,30±0,49 ^a

Medias con letra distinta son estadísticamente diferentes, n=3 (Tukey p≤0,05).

- Bello-Pérez LA, Sánchez MM, Núñez C, Rodríguez SL, Román AD (2010) Effect of the pearled in the isolation and the morphological, physicochemical and rheological characteristics of barley starch. *Carbohydrate Polymers* 81: 63-69. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.056>.
- Bradford MM (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72: 248-254. [http://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](http://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).
- Bustillos-Rodríguez JC, Tirado-Gallegos JM, Ordóñez-García M, Zamudio-Flores PB, Ornelas-Paz JJ, Acosta-Muñiz CH, Gallegos-Morales G, Páramo-Calderón DE, Ríos-Velasco C (2019) Physicochemical, thermal and rheological properties of three native corn starches. *Food Science and Technology* 39:149-57. <http://doi.org/10.1590/fst.28117>.
- Castañeda-Sánchez A (2011) Propiedades nutricionales y antioxidantes del maíz azul (*Zea mays* L.). *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 5: 75-83.
- Corzo-Ríos LJ, Solorza-Feria J, Betancur-Ancona D, Chel-Guerrero L (2014) Rheological properties and gel strength of *Phaseolus lunatus* protein/carboxymethylated flamboyant gum systems. *International Journal of Food Science & Technology* 49: 1513-1521. <http://doi.org/10.1111/ijfs.12448>.
- Debet MR, Michael JG (2006) Three classes of starch granule swelling: influence of surface proteins and lipids. *Carbohydrate Polymers* 64: 452-465. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.12.011>.
- Delgado J (2017) *La selección del híbrido de maíz*. Artículos Técnicos INTAGRI, INTAGRI. México. 3 pp.
- Díaz JLR, Bonaparte MC, Vidal Martínez VA, Parra JR, Hernández FC (2007) Propuesta para formar híbridos de maíz combinando patrones heteróticos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 453-461.
- Figueroa Cárdenas JF, Narváez González DE, Sánchez AM, Taba S, Martínez MG, Véles Medina JJ, Sánchez FR, Cuevas FA (2013) Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (Criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 305-314.
- Gaytán Bautista R y Mayek Pérez N (2010) Heterosis en híbridos de maíz producidos de cruzamientos entre progenitores de Valles Altos x Tropicales. *Investigación y Ciencia: de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 48: 4-8.
- Gutiérrez-Hernández GF, Arellano-Vázquez JL, Ceja-Torres LF, García-Ramírez E, Quiroz-Figueroa FR (2023) Heterosis in the germination process and seed characteristics of the maize hybrid (*Zea mays* L.) HAZUL 10E." XI: 119-125. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i11.2730>
- Hernández-Castillo MI, Hernández-Navarrete A, Jiménez-Montejo FE, Cruz-López MC, Hidalgo-Lara ME, López y López VE (2019) Aprovechamiento de almidón de cebada de mala calidad para la producción de enzimas amilolíticas por *Aureobasidium pullulans*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 35: 435-446. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.14>.
- Kent NL (1987) *Tecnología de los cereales; introducción para estudiantes de ciencia de los alimentos y agricultura*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 221 pp.
- Ledesma-Miramontes A, Ramírez-Díaz JL, Vidal-Martínez VA, Peña-Ramos A, Ruiz-Corral JA, Salinas-Moreno Y, Preciado-Ortiz RE (2015) Propuesta para integrar un patrón heterótico de maíz de grano amarillo para la zona de transición de México. II. Evaluación de mestizos y cruces. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38: 133-143.
- Lindeboom N, Chang PR (2004) Analytical, biochemical and physicochemical aspects of starch granule size, with emphasis on small granule starches: a review. *Starch/Stärke* 56: 89-99.
- Martínez-Gutiérrez A, Zamudio-González B, Tadeo-Robledo M, Espinosa-Calderón A, Cardoso-Galvão JC, Vázquez-Carrillo G, Turrent-Fernández A (2018) Rendimiento de híbridos de maíz grano blanco en cinco localidades de Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9: 1447-1458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1357>.
- Medina J, Salas J (2008) Morphological Characterization of Native Starch Granule: Appearance, Shape, Size and its Distribution. *Revista de Ingeniería* 27: 56-62.
- Paraginski RT, Vanier NL, Moomand Khalid, De Oliveira M, Da Rosa Zavareze E, Marques E Silva R, Dietrich Ferreira C, Moacir Cardoso E (2014) Characteristics of Starch Isolated from Maize as a Function of Grain Storage Temperature. *Carbohydrate Polymers* 102: 88-94. <http://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.019>.
- Quinto DA, Solano MQ, Silva CE (2015) Extracción y caracterización del almidón de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) negra collana, pasankalla roja y blanca junín. *Revista de La Sociedad Química Del Perú* 81: 44-54.
- Rodríguez-Pérez G, Zavala-García F, Treviño-Ramírez JE, Ojeda-Zacarias C, Mendoza-Elos M, Cervantes-Ortiz F, Gámez-Vázquez AJ, Andrio-Enríquez E, Torres-Flores JL (2019) Estimación de componentes genéticos en líneas endogámicas de maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 53: 245-258.
- Sánchez-Villa CE, Zepeda-Bautista R, Ramírez-Ortiz ME, Corzo-Ríos LJ (2020) Nixtamalized Tortillas Supplemented with Proteins Isolated from *Phaseolus Coccineus* and Huauzontle (*Chenopodium Berlandieri* Subsp. *Nuttalliae*) Flour: Rheological, Textural, and Sensorial Properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science* 22: 100274. <http://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100274>.
- SIAP S. d. (2018) Con los colores del maíz, México se pinta solo. <https://www.gob.mx/siap/articulos/con-los-colores-del-maiz-mexico-se-pinta-solo>
- Silvana M (2012) *Caracterización de almidones de maíz: nativo y modificados*. Tesis Magister en Tecnología de Alimentos. Universidad Católica de Córdoba. Argentina. 103 pp.
- Singh S, Singh J, Kaur L, Sodhi S, Gill S (2003) Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources A review. *Food Chemistry* 81: 219-231.
- Utrilla-Coello RG, Agama-Acevedo E, Barba de la Rosa AP, Martínez-Salgado JL, Rodríguez-Ambríz SL, Bello-Pérez LA (2009) Blue Maize: Morphology and Starch Synthase Characterization of Starch Granule. *Plant Foods Hum Nutr* 64: 18-24. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0106-8>.
- Vidal A, Herrera F, Ramírez JL, Hernandez JM, Sánchez JD, Coutiño B, Valdivia R (2017) *Maíces nativos de Nayarit, México*. INIFAP. Santiago Ixcuintla, Nayarit, México.
- Wang W, Zhou H, Yang H, Zhao S, Liu Y, Liu R (2017) Effects of salts on the gelatinization and retrogradation properties of maize starch and waxy maize starch. *Food Chemistry* 214: 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.040>.
- Yang Y, He S, Zhang Y, Li X, Liu H, Li Q, Cao X, Ye Y, Sun H (2021) Comparison of crude prolamins from seven kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.) based on composition, structure and functionality. *Food Chemistry* 357: 129748. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129748>.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF STARCH EXTRACTED FROM DIVERSE BLUE CORN GENOTYPES

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández, Víctor Manuel Rodríguez-Romero, Luis Edson Ramírez-Arriaga, Luis Fernando Ceja-Torres, Patricia Vázquez-Lozano, Martín Filiberto García-Mendoza and Luis Jorge Corzo-Ríos

SUMMARY

Starch is widely used in industrial food production due to the benefits it offers in terms of flavor, consistency, and shelf life. In this study, the contents of starch, protein from the starch extract, solubility index, granule swelling capacity, as well as granule size and morphology, were quantified in starch extracted from the grain of 18 blue corn genotypes (native varieties, inbred lines, and single and triple hybrids). Starch was extracted through wet milling. The starch content ranged from 40 to 68%,

and protein content from 0.6 to 1.9%. Starch granules exhibited polyhedral and oval shapes, with sizes between 10 and 30 μm . Based on its granule-associated protein value (0.62), the hybrid [(L9 $\times$ L4) $\times$ L11] exhibited high-quality starch. The genotypes that showed the greatest swelling power were Cocotitlán I (8.50), L11 (8.15), L10 $\times$ L8 (8.59), and [(L10 $\times$ L8) $\times$ L3] (8.44g water/g starch); therefore, these starches could be added to meat products, sausages, jellies, or cheeses, given their moisture-retention property.

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO AMIDO EXTRAÍDO DE GENÓTIPOS DIVERSIFICADOS DE MILHO AZUL

Germán Fernando Gutiérrez-Hernández, Víctor Manuel Rodríguez-Romero, Luis Edson Ramírez-Arriaga, Luis Fernando Ceja-Torres, Patricia Vázquez-Lozano, Martín Filiberto García-Mendoza e Luis Jorge Corzo-Ríos

RESUMO

O amido é amplamente utilizado na produção industrial de alimentos devido aos benefícios que oferece em termos de sabor, consistência e vida útil. Neste estudo, quantificaram-se os teores de amido, proteína do extrato amiláceo, índice de solubilidade, capacidade de intumescimento dos grânulos, bem como o tamanho e a morfologia dos mesmos, no amido extraído do grão de 18 genótipos de milho azul (variedades crioulas, linhagens e híbridos simples e triplos). O amido foi extraído por moagem úmida. O teor de amido variou entre 40 e 68%, e o teor de pro-

teína entre 0,6 e 1,9%. Os grânulos de amido apresentaram formas poliédricas e ovais, com tamanhos entre 10 e 30 μm . Com base no valor de proteína associada ao grânulo (0,62), o híbrido [(L9 $\times$ L4) $\times$ L11] apresentou amido de alta qualidade. Os genótipos que apresentaram maior poder de intumescimento foram Cocotitlán I (8,50), L11 (8,15), L10 $\times$ L8 (8,59) e [(L10 $\times$ L8) $\times$ L3] (8,44g de água/g de amido); portanto, seus amidos poderiam ser adicionados a produtos cárneos, embutidos, geleias ou queijos, devido à sua capacidade de reter umidade.