



CAPACIDAD DE REVENTADO DE GRANO DE AMARANTO (*Amaranthus* spp.) CON PERISPERMO CONTRASTANTE

POPPING CAPACITY OF AMARANTH (*Amaranthus* spp.) GRAIN WITH CONTRASTING PERISPERM

Miriam J. Aguilar Delgado¹, Eduardo Espitia Rangel^{2*}, Azalia Lozano Grande³, Miriam G. Valverde Ramos², Luisa F. Sesma Hernández² y Yarami G. López Rodríguez²

¹Universidad Autónoma de Chihuahua, Campus Cuauhtémoc, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Cuauhtémoc, Chihuahua, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. ³Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez, Xicotepec de Juárez, Puebla, México.

*Autor de correspondencia (espitia.eduardo@inifap.gob.mx)

RESUMEN

La capacidad de reventado del amaranto depende del genotipo, del tamaño de semilla, de la humedad y de la composición del almidón. En este estudio se determinó la frecuencia del tipo de perispermo con almidón aglutinante (AAGl) y no aglutinante (ANGl) en germoplasma de amaranto de México, y el efecto del tipo de perispermo sobre la capacidad de reventado del grano. Se utilizaron 102 accesiones de las especies *Amaranthus hypochondriacus* L. y *Amaranthus cruentus* L. para la caracterización del tipo de perispermo y 38 líneas quasi-isogénicas para observar el efecto del tipo de almidón sobre la capacidad de reventado. Las líneas se sembraron bajo un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones. El tipo de almidón de cada genotipo se identificó con un indicador colorimétrico y se observaron características morfológicas del grano entero y reventado a través de imágenes de microscopía de barrido. Los resultados mostraron que el 90 % del germoplasma de amaranto presentó perispermo opaco con almidón aglutinante, bajo contenido de amilosa, bajo peso hectolítrico y alto volumen de reventado comparado con semillas de almidón no aglutinante, mientras que el amaranto con perispermo cristalino mostró un almidón no aglutinante con bajo contenido de amiloproteína por tinción, y la presencia de una matriz lipoproteica que influye para un menor volumen de reventado y mayor peso del grano. Por lo anterior, se sugiere que el tipo de perispermo está en función de la composición del almidón e influye en las propiedades fisicoquímicas del mismo y en la capacidad de reventado de la semilla de amaranto.

Palabras clave: *Amaranthus hypochondriacus*, *Amaranthus cruentus*, amilosa, perispermo, perispermo vítreo, pseudocereal.

SUMMARY

Popping capacity of amaranth depends on the genotype, seed size, moisture and starch composition. In this study, the frequency of perisperm type with glutinous starch (GS) and non-glutinous starch (NGS) and the effect of perisperm type on grain popping capacity were determined in amaranth germplasm from Mexico. One hundred and two accessions of the species *Amaranthus hypochondriacus* L. and *A. cruentus* L. were used for characterization of perisperm type and 38 near-isogenic lines to observe the effect of starch type on popping capacity. The lines were planted under a randomized complete block design with three replications. The starch type of each genotype was identified with a colorimetric indicator and morphological characteristics of the whole and popped grain were observed through scanning microscopy images. Results showed that 90 % of the amaranth

germplasm presents opaque perisperm with glutinous starch, low amylose content, low test weight and high popping volume compared to seeds with non-glutinous starch, while amaranth with crystalline perisperm showed non-glutinous starch with low amylopectin content by staining and the presence of a lipoprotein matrix that influences lower popping volume but higher grain weight. Therefore, it is suggested that the type of perisperm is a function of the composition of the starch, and influences its physicochemical properties and the popping capacity of the amaranth seed.

Index words: *Amaranthus hypochondriacus*, *Amaranthus cruentus*, amylose, perisperm, pseudocereal, vitreous perisperm.

INTRODUCCIÓN

En México la semilla de amaranto se ha empleado tradicionalmente para la elaboración de la golosina denominada 'alegría', la cual es un producto formado con el grano reventado y aglutinado con miel de azúcar. El grano reventado se obtiene bajo ciertas condiciones de calor y humedad, y se produce por el estallido de la semilla cuando la presión interna (causada por la evaporación del agua) supera la resistencia de la capa o cubierta; este proceso produce sabor, color, aroma y mayor digestibilidad de la semilla (Lara y Ruales, 2002; Murakami *et al.*, 2014).

Durante el proceso de reventado se debe tener el control del tiempo y la temperatura, de lo contrario, ocurre desperdicio de materia prima y pérdidas en rendimiento; además, factores como la humedad ambiental, las condiciones de almacenamiento, el tamaño y forma de la semilla también pueden influir sobre el volumen de reventado, por lo que son importantes de controlar para mantener la calidad y rendimiento (Lara y Ruales, 2002; Mishra *et al.*, 2014; Zapotoczný *et al.*, 2006).

En México existen pocos estudios de amaranto que relacionen los factores genéticos con el rendimiento de reventado. En cereales se ha identificado que la época

de cosecha, la variedad y las características físicas del grano (grosor del pericarpio, peso hectolítrico y tipo de endospermo o núcleo) influyen considerablemente sobre el volumen de reventado, y son factores importantes para la calidad de industrialización (Cabrera-Ramírez *et al.*, 2020; Mishra *et al.*, 2014).

En pseudocereales, Vázquez *et al.* (1988) estudiaron en México la capacidad de reventado de 30 genotipos de diferentes especies de amaranto, reventados con aire caliente y por el método tradicional en comal; encontraron que el volumen de la semilla cruda tiene una correlación (0.98) con el volumen de la semilla reventada y los mayores rendimientos en reventado se obtuvieron de semillas pequeñas por el método de aire caliente; sin embargo, no reportaron la relación del rendimiento con la variedad o con el grosor del pericarpio, que son importantes para obtener alta calidad de reventado (Inoue *et al.*, 2009; Lara y Ruales, 2002).

En México existe gran diversidad genética en grano de amaranto para la forma, tamaño, color y tipo de perispermo (opaco y cristalino), pero no se ha logrado diseñar un método preciso de reventado que garantice rendimiento y calidad del producto industrializado (Espitia *et al.*, 2010). La característica cristalina del perispermo existe en México en diferentes especies del género *Amaranthus*; se sabe tradicionalmente que estas semillas presentan una baja calidad de reventado; sin embargo, no existen estudios científicos que confirmen tal hecho, sólo Okuno y Sakaguchi (1981) reportaron por primera vez dos tipos de perispermo en *A. hypochondriacus*, uno con perispermo cristalino y características del almidón glutinosas, y otro de perispermo opaco con características no glutinosas. Los autores mencionaron que el tipo de perispermo cristalino proviene de un carácter recesivo, y que el perispermo opaco se ha extendido por la domesticación del grano y su uso como agente aglutinante, por lo que el objetivo del presente estudio fue determinar la frecuencia del carácter opaco y cristalino del perispermo en dos especies de amaranto en México y la influencia de esta característica sobre el volumen de reventado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

En 2019 se establecieron dos ensayos en el Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Material genético

En el primer ensayo se evaluaron 102 accesiones del

banco de germoplasma de *Amaranthus*, de las cuales, 50 accesiones fueron de *A. hypochondriacus* L. y 52 de *A. cruentus*, para la caracterización del tipo de perispermo con estos grupos que representan la variabilidad de estas especies existentes en México. El segundo experimento se empleó para la comparación de tipos de almidón en la semilla, en este ensayo se utilizaron 18 líneas de semillas con perispermo opaco (Po) y almidón aglutinante (AAgl), además de 20 líneas con perispermo cristalino (Pc) y almidón no aglutinante (ANgl); ambos grupos fueron derivados de una población heterocigota; de esta población original se seleccionaron plantas de cada tipo de perispermo para avanzar por descendencia de una sola semilla hasta F₆.

Diseño y unidad experimental

En el primer ensayo los genotipos se sembraron en campo en una serie sencilla sin repeticiones, mientras que el segundo ensayo se sembró en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para ambos ensayos la unidad experimental constó de tres surcos de 5 m de largo con 0.8 m de separación

Evaluación del almidón

Del experimento de campo se tomó de cada parcela una muestra de 100 g para realizar las pruebas de laboratorio. La evaluación del tipo de almidón en las accesiones y líneas de ambos experimentos se realizó con el método de tinción con solución de I₂/KI (1 % I₂ y 2 % KI) (Bettge *et al.*, 2000). En una caja Petri se colocaron 50 granos, después se agregaron 5 mL de la solución y se colocó en reposo por 30 min hasta obtener la coloración del perispermo. Una vez humectada la semilla con la solución, se realizaron cortes transversales para observar la tinción total del perispermo.

Microscopía electrónica de barrido

Se observaron las características morfológicas de una sección de granos de amaranto entero y reventado y gránulos de almidón aislados bajo un microscopio electrónico de barrido (EVO LS10, Carl Zeiss GmbH, Jena, Alemania) para evaluar la organización interna de los gránulos de almidón y establecer diferencias entre perispermo Po y Pc. Las condiciones del instrumento eran con un voltaje de aceleración de electrones de 20.0 kV y 12-20 Pa de presión en la cámara de muestra. Las imágenes fueron obtenidas de la señal de electrones de retrodispersión.

Capacidad de reventado del grano

Previo al acondicionamiento de las muestras para el

reventado, se midió el peso hectolítrico por el método directo de densidad empleando un vaso hectolítrico y una balanza digital (Ohaus SP602 Scout Pro, Parsippany, New Jersey, EUA). El peso hectolítrico se registró en kg hL⁻¹, ajustando el dato con tablas de humedad; posteriormente, se prepararon 10 g de muestra con tres repeticiones de cada genotipo. A cada muestra se le determinó la humedad mediante secado en una estufa a 60 °C hasta peso constante y se adicionó el agua necesaria para llegar al 14 % de humedad. Una vez acondicionadas se procedió a realizar el reventado en muestras de 30 g de grano, con aire caliente a 230 °C.

Las pruebas de reventado se realizaron con un mini reventador eléctrico de lecho fluidizado (Amaranta®, San Miguel de Proyectos Agropecuarios, Hidalgo, México), se recolectó el grano reventado y el no reventado y se pasó por un tamiz de malla ASTM No. 16, de acero inoxidable (Tyler 5197, West Conshohocken, Pennsylvania, EUA) para separar los granos no reventados que atravesaron por la cámara del reventador (Konishi *et al.*, 2014; Lara y Ruales, 2002). Finalmente, se midieron las variables de volumen de reventado (cm³) con ayuda de una probeta graduada de 4 cm de diámetro, así como el peso del grano no reventado (g) y se calculó el incremento de volumen con respecto al volumen inicial de la semilla (cm³/cm³).

Análisis estadístico

A las variables medidas se les realizó análisis de varianza utilizando el procedimiento GLM del SAS/STAT® 9.2 y la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación del almidón

En el Cuadro 1 se muestran los resultados obtenidos con el método de tinción aplicado a las 102 accesiones de amaranto. Del total del germoplasma evaluado, 90.2 % presentó reacción roja y 9.8 % azul-violeta. Por especie, en *A. hypochondriacus* el 84 % presentó reacción roja y

el 16 % azul-violeta, mientras que en *A. cruentus* el 96.2 % presentó reacción roja y sólo el 3.8 % presentó tinción azul. La reacción azul-violeta intensa indica que el almidón contiene amilosa, ya que por su naturaleza, el polisacárido tiene la capacidad de formar complejos con el yodo presente en el reactivo empleado (Hoseney *et al.*, 1983; Taggart, 2004).

Por otra parte, la tinción roja representa un bajo contenido de amilosa, lo que imparte la característica glutinosa al almidón, mientras que las semillas con tinción azul-violeta presentan mayor contenido de amilosa, que les confiere características no aglutinantes. El carácter aglutinante bajo se debe a que se reduce la interacción de los enlaces intermoleculares a través de puentes de hidrógeno, produciendo un gel suave, adhesivo y de baja cohesividad (Carrasquero-Durán y Navas, 2015; Wang *et al.*, 2015).

Al amaranto se le considera, de forma genérica, una semilla cerosa con bajo contenido de amilosa (3-12 %) y características no aglutinantes; sin embargo, lo anterior no es totalmente demostrable debido a que en la gran mayoría de los reportes sólo se menciona la variedad y no se especifica el tipo de perispermo. Por otro lado, dentro de la diversidad genética de *Amaranthus* se puede presentar material genético con mayor contenido de amilosa, como se ha observado en los resultados presentados en este documento. El comportamiento del almidón de semillas cerosas y no cerosas se ha reportado ampliamente en cereales como maíz, cebada y arroz, donde un incremento en el contenido de amilosa modifica el acomodo de la amilopectina, influye en la aglutinación del almidón y, finalmente, en las propiedades fisicoquímicas y funcionales (De Bock *et al.*, 2021; Eliasson y Gudmunsson, 2006).

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Figura 1 se muestran imágenes SEM de cortes transversales de semilla entera y reventada con ambos tipos de perispermo (Pc, Po), en éstas se observan diferencias estructurales de los gránulos de almidón, donde el Pc (Figura 1B) presenta gránulos de menor

Cuadro 1. Número de accesiones, porcentaje y reacción al yodo del germoplasma clasificado por especie y tipo de perispermo.

Especie	Accesiones	Perispermo cristalino (Pc)			Perispermo opaco (Po)		
		Número	%	Coloración	Número	%	Coloración
<i>A. cruentus</i>	52	2	3.8	Azul	50	96.2	Rojo
<i>A. hypochondriacus</i>	50	8	16.0	Azul	42	84.0	Rojo
Total	102	10	9.8	Azul	92	90.2	Rojo

tamaño, formas poliédricas compactas y presencia de cuerpos lipídicos y proteicos rodeando los gránulos de almidón; en cambio, las semillas de perispermo opaco presentan gránulos más grandes con estructuras amorfas y poros hacia el interior (Figura 1A). Las características de los gránulos de almidón del Po coinciden con lo reportado previamente para *Amaranthus*, donde se describen gránulos de almidón de forma poligonal con caras ligeramente abolladas y tamaños de 0.75-2 μm (Perez-Rea y Antezana-Gomez, 2018); en tanto, los cuerpos lipídicos y proteicos que rodean a los gránulos de almidón en el Pc son similares a lo reportado en endospermos vítreos de cereales, cuya apariencia traslúcida se asocia con altos contenidos de proteína y lípidos (Shahin y Symons, 2008; Zurak *et al.*, 2020).

Tester y Morrison (1992) sugirieron que la hinchazón del almidón es una propiedad de la amilopectina, pero la amilosa influye como diluyente, mientras que los lípidos inhiben fuertemente la hinchazón a través de complejos de inclusión con parte de la amilosa. Esto coincide con los resultados obtenidos en las imágenes de microscopía electrónica de barrido en este estudio y con el bajo

rendimiento de reventado del Pc, lo que puede sugerir que amarantos de Pc se pueden utilizar para desarrollar variedades con almidón no aglutinante pero de alto valor proteico (Bojórquez-Velázquez *et al.*, 2018).

En las Figuras 1C y 1D se muestran las estructuras internas de la semilla reventada con Po y Pc, respectivamente, en éstas se observan diferencias en los poros formados durante la expansión de los gránulos de almidón. La semilla con Po presenta poros más grandes y homogéneos que los de Pc, lo cual indica mejor calidad de reventado en el primer caso. Lara y Ruales (2002) mencionaron que el tamaño y estructura de los poros está relacionado con la capacidad de reventado de la semilla debido a que el núcleo o endospermo se transforma en una matriz esponjosa cuando los gránulos de almidón se funden por efecto de la temperatura y el vapor de agua contenida entre los poros rompen la matriz del endospermo. A mayor tamaño de poros presentes entre los gránulos de almidón se facilita la disipación del vapor de agua y se favorece el reventado homogéneo del gránulo (Hoseney *et al.*, 1983). Lo anterior no sucede en las semillas con Pc debido, posiblemente, a que el contenido de lípidos

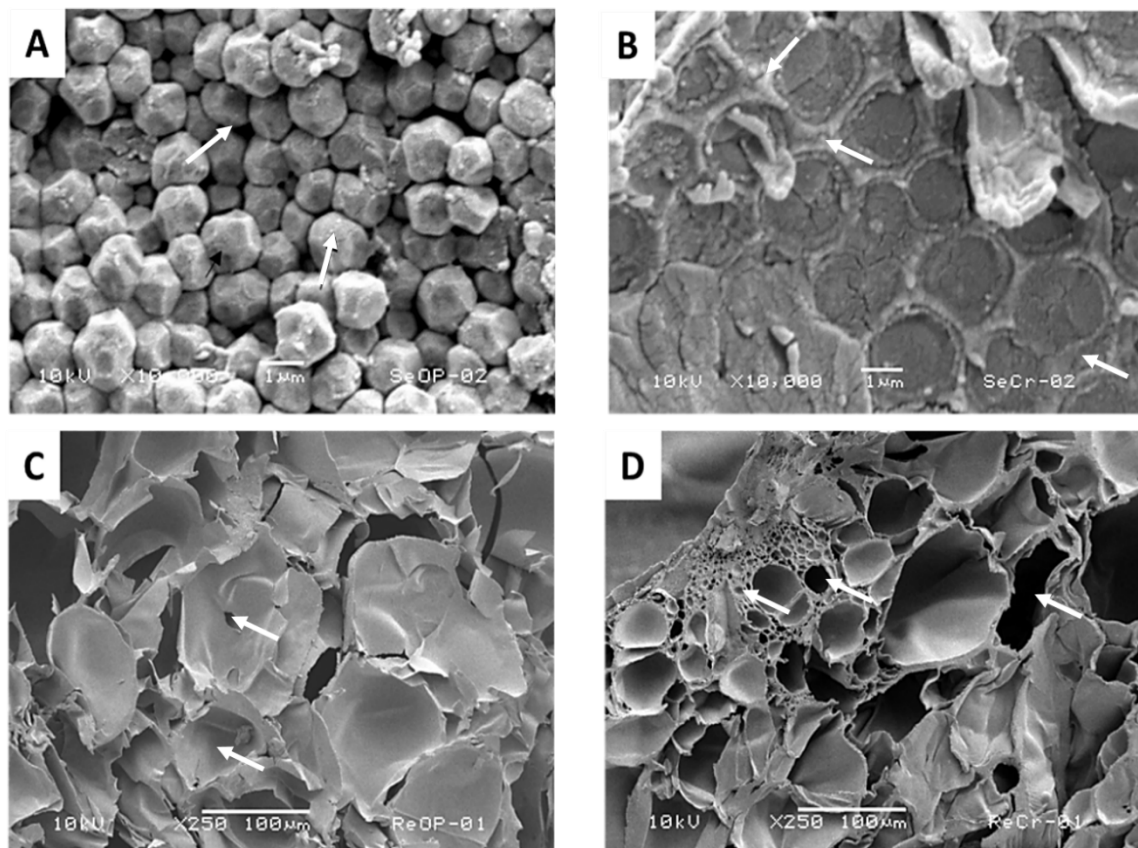


Figura 1. Cortes de semilla de *Amaranthus* entera y reventada. A) disposición de gránulos de almidón en semilla con Po, B) gránulos de almidón con Pc, C) semilla reventada con perispermo opaco, D) semilla reventada con perispermo cristalino.

y proteínas entre los gránulos de almidón influyen en la reducción de la expansión del grano.

Capacidad de reventado

Al evaluar la capacidad de reventado de todos los genotipos con perispermo opaco y cristalino (aglutinantes y no aglutinantes) se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) para el tipo de perispermo en todas las variables estudiadas (Cuadro 2), ésto coincide con los resultados de tinción y las imágenes SEM donde el tipo de perispermo tiene efecto sobre la capacidad de reventado en amaranto. Las semillas de perispermo opaco presentaron mayor volumen porque existe más espacio entre los gránulos de almidón, lo que permite la movilización del calor y la expansión (Hoseney *et al.*, 1983).

Para la fuente de variación Genotipos se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) relacionadas con el tipo de perispermo para todas las variables, excepto para peso de grano sin reventar, mientras que para genotipos con Pc (con ANgl) sólo se encontraron diferencias significativas para peso hectolítrico. Lo anterior reafirma resultados previos, donde las semillas con Po presentan tamaños de semillas más pequeñas, que junto con el tipo de almidón, influyen sobre las propiedades funcionales y la capacidad de reventado (Okuno and Sakaguchi, 1981; Tovar *et al.*, 2018).

En el Cuadro 3 se presenta la comparación de medias para las variables estudiadas, se observa que las líneas de semillas de amaranto con perispermo opaco presentaron menor peso hectolítrico, pero mayor volumen de reventado e incremento de volumen, en tanto que las semillas con perispermo cristalino presentaron mayor peso del grano,

pero menor volumen de reventado. Lo anterior se debe posiblemente al mayor contenido de proteínas y lípidos de las semillas con Pc, que al estar empaquetados en una sola matriz producen granos más pesados, mientras que las de perispermo opaco producen granos amorfos. Vázquez *et al.* (1988) presentaron resultados similares en genotipos de amaranto mexicano, donde los mayores volúmenes de semilla expandida se obtuvieron de semillas pequeñas, con menor volumen en crudo; además, los autores mencionaron que el mayor volumen de reventado se presentó en semillas de perispermo opaco, lo cual a su vez confirma el conocimiento tradicional que se tiene de las semillas opacas en las regiones productoras de amaranto en México.

Es interesante mencionar que Okuno y Sakaguchi (1981) y do Carmo *et al.* (2020) mencionaron que el carácter aglutinante de las semillas opacas con bajo o nulo contenido de amilosa es recesivo, lo que indica, en términos genéticos, que el perispermo cristalino es el estado normal y original de la semilla de amaranto, por lo que en algún momento ocurrió una mutación apareciendo semillas con perispermo opaco de casi nulo contenido de amilosa. La pregunta entonces es evidente ¿por qué la gran mayoría del germoplasma en México (90.2 %) es aglutinante aun cuando la condición del gen es recesiva? No se sabe con certeza cuándo se empezó a utilizar el amaranto reventado, pero eventualmente el mejorador tradicional, al percatarse de la mejor capacidad de reventado, fue seleccionando ese carácter, dando como resultado que la mayoría de los amarantos cultivados en México sean de perispermo opaco.

Por otra parte, los granos opacos posiblemente fueron seleccionados por su carácter aglutinante; Montúfar

Cuadro 2. Análisis de varianza para las variables evaluadas en el reventado de grano de genotipos de amaranto y tipos de perispermo.

Fuente de variación	gl	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Volumen de grano reventado (cm ³)	Peso de grano sin reventar (g)	Incremento de volumen (cm ³ /cm ³)
Repetición	2	0.00044	1130.21	1155.43	11.28
Almidón	1	0.00864**	15,435.19**	10,876.53**	153.06**
Genotipos	36	0.00045**	654.24**	389.67	6.45**
Agglutinante [†]	17	0.00065**	920.98**	4.28	9.11**
No aglutinante ^{††}	19	0.00046**	476.54	2.22	4.69
Error	88	0.00016	342.48	398.50	3.38

** $P \leq 0.01$. gl: grados de libertad, [†] almidón aglutinante de perispermo opaco, ^{††} almidón no aglutinante de perispermo cristalino.

Cuadro 3. Comparación de medias para las variables evaluadas en grano reventado de genotipos de amaranto.

Tipo de almidón	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Volumen de grano reventado (cm ³)	Peso de grano sin reventar (g)	Incremento de volumen (cm ³ /cm ³ *)
Aglutinante [†]	84.10b	46.59a	3.23b	4.63a
No aglutinante ^{††}	85.50a	24.00b	5.05a	2.38b

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). [†]almidón aglutinante de perispermo opaco, ^{††}almidón no aglutinante de perispermo cristalino, *volumen semilla/volumen reventado

(2016) menciona que los aztecas utilizaban el *huauhtli* o amaranto, en algunas festividades ofrecían 'tortas en forma de rodajas hechas de bledo' o en forma en *tzoalli* (masa de amaranto), con la cual hacían figuras de sus dioses utilizando miel (no de abeja) como agente aglutinante. Desde esa época hasta la actualidad, el grano reventado es la forma más común de consumir el amaranto.

En el Cuadro 4 se presenta la comparación de medias de las variables evaluadas para 20 líneas de semillas de amaranto con perispermo opaco (AAgl) y en el Cuadro 5 las líneas de perispermo cristalino (almidón no aglutinante). La variación entre líneas fue en el peso hectolítrico (81.1

a 86.5 kg HL⁻¹), en el volumen de reventado (25 a 81 cm³) y en el incremento de volumen (2.5 a 8.1 veces), mientras que para grano no reventado no se obtuvieron diferencias. La importancia de identificar materiales sobresalientes radica en que los genotipos de perispermo opaco podrán ser la base para desarrollar variedades con AAgl, los cuales tienen la propiedad de mantener bajos niveles de concentración de dipeptidil peptidasa-4 y disminuir la actividad de la enzima convertidora de angiotensina en el humano, lo que aporta beneficios a la salud y mejora la capacidad de reventado del grano (Bojórquez-Velázquez *et al.*, 2018). De los resultados de ambos cuadros se puede observar que el mayor volumen de reventado lo presentó

Cuadro 4. Variables evaluadas en la capacidad de reventado de 20 líneas de amaranto con almidón aglutinante (perispermo opaco).

Línea	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Volumen de grano reventado (cm ³)	Peso de grano no reventado (g)	Incremento de volumen (cm ³ /cm ³) [†]
Línea-8	85.2 ab	81.00 a	0.60 a	8.06 a
Línea-12	85.0 ab	68.00 ab	2.60 a	6.76 ab
Línea-18	84.5 ab	65.20 ab	3.14 a	6.50 ab
Línea-3	86.5 a	62.40 ab	2.42 a	6.20 ab
Línea-13	83.5 ab	61.50 ab	3.35 a	6.09 ab
Línea-11	83.4 ab	53.80 ab	2.26 a	5.36 ab
Línea-15	82.7 ab	53.00 ab	2.75 a	5.30 ab
Línea-10	81.5 b	51.50 ab	3.45 a	5.10 ab
Línea-7	84.7 ab	44.00 ab	3.40 a	4.40 ab
Línea-9	81.1 b	44.00 ab	3.35 a	4.39 ab
Línea-1	85.3 ab	42.67 ab	3.53 a	4.24 ab
Línea-2	84.0 ab	41.25 ab	2.15 a	4.09 ab
Línea-5	85.3 ab	33.40 ab	3.74 a	3.31 ab
Línea-4	81.5 b	30.50 ab	3.85 a	3.02 ab
Línea-19	83.6 ab	28.60 b	4.40 a	2.84 b
Línea-6	83.6 ab	27.33 b	4.10 a	2.73 b
Línea-20	82.7 ab	27.00 b	3.25 a	2.70 b
Línea-17	84.6 ab	25.00 b	5.35 a	2.50 b

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$). [†]Volumen semilla/volumen en reventado.

Cuadro 5. Variables evaluadas para determinar la capacidad de reventado de 20 líneas de amaranto con almidón no aglutinante (perispermo cristalino).

Línea	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)	Volumen de grano reventado (cm ³)	Peso de grano no reventado (g)	Incremento de volumen (cm ³ /cm ³) [†]
Línea-20	84.8 ab	44.67 a	3.37 a	4.43 a
Línea-9	86.2 ab	43.40 a	3.64 a	4.30 a
Línea-16	85.3 ab	41.20 a	3.84 a	4.09 a
Línea-1	84.1 ab	33.00 a	3.40 a	3.29 a
Línea-13	85.4 ab	33.00 a	4.53 a	3.27 a
Línea-6	87.1 ab	26.60 a	4.42 a	2.65 a
Línea-10	83.5 b	26.00 a	5.05 a	2.58 a
Línea-5	86.8 ab	24.33 a	5.37 a	2.42 a
Línea-19	84.8 ab	24.33 a	5.33 a	2.41 a
Línea-12	85.3 ab	23.67 a	4.53 a	2.35 a
Línea-14	84.3 ab	20.50 a	5.08 a	2.05 a
Línea-15	84.7 ab	19.67 a	5.47 a	1.97 a
Línea-7	86.1 ab	18.00 a	4.35 a	1.80 a
Línea-4	85.5 ab	17.50 a	5.80 a	1.75 a
Línea-11	85.8 ab	16.33 a	6.40 a	1.62 a
Línea-17	87.1 a	14.50 a	5.90 a	1.44 a
Línea-2	86.0 ab	13.80 a	6.00 a	1.37 a
Línea-8	85.8 ab	12.80 a	6.16 a	1.27 a
Línea-3	85.8 ab	11.40 a	6.16 a	1.13 a
Línea-18	85.8 ab	10.33 a	6.93 a	1.03 a

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey ≤ 0.05). [†]Volumen semilla/volumen en reventado.

la Línea 8 de semillas con perispermo opaco.

CONCLUSIONES

El 90 % del germoplasma de amaranto evaluado de México presenta almidón aglutinante en semillas con perispermo opaco, mientras que los genotipos con almidón no aglutinante presentan semillas de perispermo cristalino. El perispermo cristalino es menos frecuente en *A. cruentus* (3.8 %) que en *A. hypochondriacus* (16 %). En el perispermo los gránulos de almidón no aglutinante se encuentran empaquetados en una matriz lipoproteica que influye para un bajo volumen de reventado, mientras que los gránulos de almidón aglutinante están más separados, lo que facilita el proceso de reventado y un mayor volumen. El grupo con el carácter de almidón aglutinante tuvo más variación para capacidad de reventado de grano que el de almidón no aglutinante. El perispermo modifica la

estructura, las propiedades fisicoquímicas del almidón y la capacidad de reventado de la semilla de amaranto.

BIBLIOGRAFÍA

- Bettge A. D., M. J. Giroux and C. F. Morris (2000) Susceptibility of waxy starch granules to mechanical damage. *Cereal Chemistry* 77:750-753, <https://doi.org/10.1094/CHEM.2000.77.6.750>
- Bojórquez-Velázquez E., J. A. Velarde-Salcedo, A. De León-Rodríguez, H. Jiménez-Islas, J. L. Pérez-Torres, A. Herrera-Estrella, ... and A. P. Barba de la Rosa (2018) Morphological, proximal composition, and bioactive compounds characterization of wild and cultivated amaranth (*Amaranthus* spp.) species. *Journal of Cereal Science* 83:222-228, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.004>
- Cabrera-Ramírez A. H., F. G. Castro-Campos, M. Gaytán-Martínez and E. Morales-Sánchez (2020) Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality. *Journal of Cereal Science* 95:102999, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102999>
- Carrasquero-Durán A. y P. B. Navas (2015) Determinación de amilosa en presencia de amilopectina en almidón de arroz aplicando la espectroscopia derivada. *Alimentos, Ciencia e Investigación* 23:11-20.

- De Bock P., L. Daelemans, L. Selis, K. Raes, P. Vermeir, M. Eeckhout and F. Van Bockstaele (2021) Comparison of the chemical and technological characteristics of wholemeal flours obtained from amaranth (*Amaranthus* sp.), quinoa (*Chenopodium quinoa*) and buckwheat (*Fagopyrum* sp.) seeds. *Foods* 10:651, <https://doi.org/10.3390/foods10030651>
- do Carmo C. D., M. B. Sousa., P. P. S. Silva., G. A. F. Oliveira, H. Ceballos and E. J. de Oliveira (2020) Identification and validation of mutation points associated with waxy phenotype in cassava. *BMC Plant Biology* 20:164, <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02379-3>
- Eliasson A. C. and M. Gudmundsson (2006) Starch: physicochemical and functional aspects. In: Carbohydrates in Food. 2nd edition. A. C. Eliasson (ed.). Taylor & Francis Group. New York USA. pp: 391-464.
- Espitia R. E., C. Mapes S., D. Escobedo L., M. De la O O., P. Rivas V., G. Martínez T., ... y J. M. Hernández C. (2010) Conservación y Uso de los Recursos Genéticos de Amaranto en México. Centro de Investigación Regional Centro, INIFAP. Celaya, Guanajuato, México. 200 p.
- Hosene R. C., K. Zeleznak and A. Abdelrahman (1983) Mechanism of popcorn popping. *Journal of Cereal Science* 1:43-52, [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(83\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(83)80007-1)
- Inoue T., H. Iyota, T. Uemura, J. Yamagata, Y. Konishi and Y. Tatemoto (2009) Optimal conditions for popping amaranth seeds. *Drying Technology* 27:918-926, <https://doi.org/10.1080/07373930902988254>
- Konishi Y., H. Iyota, K. Yoshida, J. Moritani, T. Inoue, N. Nishimura and T. Nomura (2014) Effect of moisture content on the expansion volume of popped amaranth seeds by hot air and superheated steam using a fluidized bed system. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 68:2186-2189, <https://doi.org/10.1271/bbb.68.2186>
- Lara N. and J. Ruales (2002) Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Science of Food and Agriculture* 82:797-805, <https://doi.org/10.1002/jsfa.1069>
- Montúfar L. A. (2016) Ofrendas de amaranto para los dioses de la lluvia, tradición mesoamericana. *Arqueología Mexicana* 23:54-58.
- Mishra G., D. C. Joshi and B. K. Panda (2014) Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of Grain Processing and Storage* 1:34-46.
- Murakami T., A. Yutani, T. Yamano, H. Iyota and Y. Konishi (2014) Effects of popping on nutrient contents of amaranth seed. *Plant Foods for Human Nutrition* 69:25-29, <https://doi.org/10.1007/s11130-013-0392-7>
- Okuno K. and S. Sakaguchi (1981) Glutinous and non-glutinous starches in perisperm of grain amaranths. *Cereal Research Communications* 9:305-310.
- Perez-Rea D. and R. Antezana-Gomez (2018) The functionality of pseudocereal starches. In: Starch in Food: Structure, Function and Applications. Second edition. M. Sjöö and L. Nilsson (eds.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:509-542, <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100868-3.00012-3>
- Shahin M. A. and S. J. Symons (2008) Detection of hard vitreous and starchy kernels in amber durum wheat samples using hyperspectral imaging (GRL Number M306). *NIR News* 19:16-18, <https://doi.org/10.1255/nirn.1086>
- Taggart P. (2004) Starch as an ingredient: manufacture and applications. In: Starch in Food: Structure, Function and Applications. A. C. Eliasson (ed.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:363-392, <https://doi.org/10.1533/9781855739093.3.363>
- Tester R. F. and W. R. Morrison (1992) Swelling and gelatinization of cereal starches. III. Some properties of waxy and normal nonwaxy barley starches. *Cereal Chemistry* 69:654-658.
- Tovar L. R., M. A. Valdivia and E. Brito (2018) Popping amaranth grain, state of the art. In: Amaranth Biology, Chemistry and Technology. O. Paredes-López (ed.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:143-154.
- Vázquez C. M. G., E. Espitia R. y A. R. Márquez S. (1988) Potencial de reventado y calidad proteínica del amaranto. In: Investigaciones Recientes sobre Amaranto. T. Reyna T. (coord.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México D. F. pp:79-86.
- Wang S., C. Li, L. Copeland, Q. Niu and S. Wang (2015) Starch retrogradation: a comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 14:568-585, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12143>
- Zapotoczny P., M. Markowski, K. Majewska, A. Ratajski and H. Konopko (2006) Effect of temperature on the physical, functional, and mechanical characteristics of hot-air-puffed amaranth seeds. *Journal of Food Engineering* 76:469-476, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.045>
- Zurak D., K. Kljak and D. Grbeša (2020) The composition of floury and vitreous endosperm affects starch digestibility kinetics of the whole maize kernel. *Journal of Cereal Science* 95:103079, <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103079>