RENDIMIENTO Y VOLUMEN DE EXPANSIÓN DE GRANO DE VARIEDADES MEJORADAS DE AMARANTO PARA VALLES ALTOS DE PUEBLA

GRAIN YIELD AND EXPANSION VOLUME OF IMPROVED VARIETIES OF AMARANTH FOR HIGH VALLEYS OF PUEBLA

Enrique Ortiz-Torres[1]*, Adrián Argumedo-Macías[1], Hugo García-Perea[2], Rocío Meza-Varela[2], Roberto Bernal-Muñoz[2] y Oswaldo R. Taboada-Gaytán[1]

[1]Campus Puebla, Colegio de Postgraduados. km 125.5 Carr. Federal México-Puebla, Santiago Momoxpan. 72760, San Pedro Cholula, Puebla, México.
[2]Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala. km 7.5 Carr. Federal San Martín-Tlaxcala. 90122, San Diego Xocoyucan, Tlaxcala, México.

**Autor para correspondencia* (enriqueortiz@colpos.mx)

RESUMEN

En el cultivo de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) no se han realizado evaluaciones que aborden de manera simultánea la producción comercial de grano y su volumen de expansión en las variedades cultivadas en México. El objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento, su estabilidad y expansión de grano, así como algunas características agronómicas de 10 variedades de amaranto en cinco localidades de los Valles Altos de Puebla. Se evaluaron siete variedades mejoradas: Nutrisol, Revancha, Laura, Gabriela, Diego, Areli y PQ_2. Los testigos fueron dos poblaciones locales identificadas como C30 y C2, y la población del agricultor cooperante (CrPr) donde se estableció cada ensayo. Las evaluaciones en campo se hicieron en Tochimizolco, Tecuanipan, Calpan, Chiautzingo y Ciudad Serdán, en el estado de Puebla, México, utilizando un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones en cada localidad. Las variables medidas fueron rendimiento de grano (REND), días a floración masculina, altura de planta, longitud de panoja, peso hectolítrico y peso de mil semillas. En reventado de grano se midió volumen de expansión (VEXP) y rendimiento de grano reventado. Se realizó análisis de varianza, prueba de medias y análisis de estabilidad para REND y VEXP mediante el modelo AMMI. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas entre variedades y localidades en casi todas las variables; la interacción variedade × localidade fue significativa en seis de siete variables registradas. Las variedades sobresalientes en REND fueron C30, Laura, C2, CrPr y Nutrisol, con 3439, 3272, 3020, 2885 y 2847 kg ha^{-1}, respectivamente. En VEXP, C2 fue la mejor variedad con 10.0 mL g^{-1}. El análisis AMMI de REND mostró que las variedades más estables fueron Laura y Diego, mientras que en VEXP las más estables fueron Gabriela, Nutrisol y Laura. La mejor variedad mejorada fue Laura ya que presentó alto REND, aceptable VEXP y estabilidad en REND y VEXP.

Palabras clave: *Amaranthus hypochondriacus*, estabilidad, México, rendimiento, volumen de expansión.

SUMMARY

In amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), currently there are no evaluations that simultaneously address commercial grain production and popping expansion of grain in cultivated varieties grown in Mexico. The objective of this study was to evaluate grain yield, its stability and popping expansion, as well as some agronomic characteristics of ten amaranth varieties in five locations of the highlands of Puebla. Seven improved varieties were evaluated: Nutrisol, Revancha, Laura, Gabriela, Diego, Areli, and PQ_2. The controls were two local populations identified as C30 and C2, and the population of the cooperating farmer (CrPr) where each trial was established. Field evaluations were carried out in Tochimizolco, Tecuanipan, Calpan, Chiautzingo and Ciudad Serdán, in the state of Puebla, México using a randomized complete blocks design with three replications in each locality. The registered traits were grain yield (REND), days to flowering, plant height, panicle length, specific weight and weight of one-thousand seeds. In popping expansion, the popping volume (PV) and popped-grain yield (PGY) were measured. Analysis of variance, means test and stability analysis for REND and PV were performed using the AMMI model. The analysis of variance showed statistically significant differences among varieties and localities for almost all traits ; the interaction variety x location was significant for six out of the seven traits measured. The outstanding varieties in REND were C30, Laura, C2, CrPr and Nutrisol, with 3439, 3272, 3020, 2885 and 2847 kg ha^{-1}, respectively. In VP, C2 was the best variety with 10.0 mL g^{-1}. The AMMI analysis of REND showed that the most stable varieties were Laura and Diego. In VEXP the most stable were Gabriela, Nutrisol, and Laura. The best improved variety was Laura as it presented high REND, an acceptable VP and stability in both REND and VP.

Index words: *Amaranthus hypochondriacus*, stability, Mexico, yield, popping expansion.

INTRODUCCIÓN

El amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) es un cultivo ancestral en México que presenta una amplia diversidad genética (Ruiz *et al.*, 2013) y representa una alternativa para mejorar la alimentación de las personas, sobre todo en el medio rural, ya que el grano y la planta tienen alta calidad nutricional (Venskutonis y Kraujalis, 2013). En México se consume principalmente como grano reventado o expandido (Escobedo-López *et al.*, 2012). El reventado confiere al grano mejor sabor, color, aroma e incrementa la calidad de la proteína (Morales *et al.*, 2014). El reventado del grano se debe a que el aire caliente utilizado para este fin provoca que el agua en la matriz de almidón del grano se evapore e incremente la temperatura y la presión interna del grano, lo que ocasiona la ruptura del pericarpio; en este proceso, los granos de almidón se disuelven y los poros se expanden, lo que resulta en una matriz esponjosa (Castro-Giráldez *et al.*, 2012). Obtener alto volumen de

Recibido: 18 de septimbre de 2017
Aceptado: 10 de abril de 2018

expansión en el grano de amaranto es importante debido a que esta característica se asocia con un incremento de la palatabilidad (Dofing *et al.*, 1990). Adicionalmente, en el caso de los productos elaborados con grano reventado que se comercializan por volumen, es posible obtener mayor margen de ganancias económicas al contar con más volumen de materia prima a procesar.

En el cultivo de amaranto existen pocas evaluaciones de variedades para producción comercial en México; los reportes más recientes son de García-Pereyra *et al.* (2011) en Durango, Torres *et al.* (2006) en Ciudad de México y Ramírez *et al.* (2011) en Tlaxcala; pero no existen evaluaciones que aborden en el mismo estudio la producción comercial de grano y la determinación del volumen de expansión para variedades mejoradas o nativas que se cultivan en los Valles Altos, por lo que es necesario determinar los mejores genotipos disponibles para estas condiciones y algunas características de procesamiento del grano cosechado. En la selección de las mejores variedades a recomendar para su siembra comercial en una región determinada, es de interés elegir los genotipos con comportamiento superior en cuanto a rendimiento de grano y que presenten características agronómicas sobresalientes en diferentes ambientes; sin embargo, la elección de las variedades rendidoras y estables se dificulta debido a los diferentes niveles de respuesta, en ocasiones contrastantes, entre las variedades a través de ambientes (Ferreira *et al.*, 2006).

Diversas definiciones y metodologías han sido usadas para estudiar la estabilidad del rendimiento (Becker y Léon, 1988). Un método usado en la actualidad es el modelo AMMI, o modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (Hongyu *et al.*, 2014). El método AMMI combina el análisis de los efectos principales aditivos (variedades y ambientes) con un análisis de varianza y el análisis de los efectos no aditivos o multiplicativos (interacción) con análisis de componentes principales (Crossa *et al.*, 1990; Gauch, 1988). Esta metodología ha mostrado su utilidad para estudiar la estabilidad en maíz (*Zea mays* L.) (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2016) y en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (López-Salinas *et al.*, 2015).

En el año agrícola 2016 se reportaron 4545 ha cosechadas de amaranto en México (SIAP, 2017). La zona de producción más importante se encuentra en el centro del país e incluye los estados de Puebla, Tlaxcala y Estado de México, con una superficie cosechada de 2088, 1556 y 400 ha, respectivamente. El estado de Puebla concentró 46 % de la superficie cosechada. En este estado, los municipios más importantes fueron Tochimilco, Cohuecan y Atzitzihuacán, con 1160, 265 y 205 ha, respectivamente (SIAP, 2017). Las variedades usadas son mayormente poblaciones locales, aun cuando existen variedades mejoradas obtenidas por algunas instituciones y recomendadas para diversas regiones. El Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias ha liberado las variedades Nutrisol y Revancha, el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala tiene registradas las variedades Laura y Gabriela, y la Universidad Autónoma Chapingo tiene las variedades mejoradas Areli, Diego y PQ_2, las cuales aún no están registradas, pero ya se encuentran disponibles. Todas tienen en común que son de la especie *Amaranthus hypochondriacus* L. y recomendadas para valles altos.

Estas variedades presentan, entre otras características, resistencia al acame, floración precoz a intermedia y buen rendimiento de grano; empero, no existe una evaluación del comportamiento agronómico de las variedades mejoradas para el estado de Puebla. Para la producción comercial y rentable de amaranto es necesario contar con variedades con alto rendimiento de grano, características agronómicas favorables y alto volumen de expansión de grano reventado. Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de grano y precisar las características agronómicas a través de varios ambientes en los valles altos del estado de Puebla y estimar la estabilidad del rendimiento y de volumen de grano reventado de variedades mejoradas de amaranto recomendadas para esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético

Se evaluaron 10 variedades de amaranto, de las cuales siete fueron mejoradas y tres nativas como testigos. Las variedades mejoradas evaluadas fueron Nutrisol, Revancha, Gabriela, Laura, Diego, Areli y PQ_2. Los testigos fueron dos poblaciones sobresalientes de la zona de Tochimilco (identificadas como C30 y C2) y la población del productor cooperante (CrPr) donde se instaló cada ensayo.

Sitios de evaluación

Los sitios de evaluación fueron Santiago Tochimizolco, San Jerónimo Tecuanipan y Calpan en 2014, y San Lorenzo Chiautzingo y Ciudad Serdán en 2015. En el Cuadro 1 se presentan datos sobre la localización, características del clima y tipo de suelo de cada sitio. En todos los sitios el clima es templado subhúmedo con lluvias en verano.

Diseño y unidad experimental

En todos los sitios se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela

experimental consistió en dos surcos de 5 m de largo, con una distancia entre surcos de 0.8 m.

Manejo del cultivo

En el año agrícola 2014 la siembra se realizó el 3, 6 y 23 de junio en Tochimizolco, Tecuanipan y Calpan, respectivamente. En 2015 la siembra fue el 27 de mayo y 3 de junio en Ciudad Serdán y Chiautzingo, respectivamente. En todas las localidades la semilla se depositó a una distancia de 20 cm entre matas, para después aclarear a dos plantas por mata, lo que dio por resultado una densidad de población de 125,000 plantas ha^{-1}.

La fórmula de fertilización utilizada fue 80N-40P-00K, con urea y fosfato diamónico como fuentes. La fertilización se aplicó al momento de la primera escarda, a los 30-35 días después de la siembra. La segunda escarda se realizó a los 40-45 días después de la siembra.

Variables registradas

Las variables que se midieron en campo fueron rendimiento de grano (REND), considerado como el peso de grano limpio al 10 % de humedad y expresado en kg ha^{-1}; días a floración masculina (DAFM), que es el número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50 % de la población presentó antesis o liberación de polen. Adicionalmente, en una muestra de cinco plantas fenotípicamente representativas de cada parcela, se determinó altura de planta (APTA), que fue la distancia en centímetros del suelo a la punta de la inflorescencia; longitud de panoja (LPAN), medida como la distancia entre el inicio y la punta de la panoja y expresada en cm; peso hectolítrico (PHL), considerado como el peso de la semilla contenida en una jarra metálica de 100.0 mL y se registró en kg hL^{-1}; y peso de mil semillas (PMILS), que fue el peso en g de dicha cantidad de semillas.

El reventado de grano se efectuó por duplicado en una máquina reventadora portátil de lecho fluidizado con aire caliente a 232 ºC, propiedad del Colegio de Postgraduados Campus Puebla (patente en trámite), mediante una muestra de 15 g con un contenido de humedad del 12 % por cada variedad. El grano reventado se pasó por un tamiz de pruebas físicas número 16 (Montinox, México), que tiene una abertura de 1.19 mm, para determinar las variables peso de grano reventado (PREV), que es el peso en g del grano reventado que quedó sobre el tamiz; volumen de expansión total de grano reventado (VTRV), que es el volumen en mL del grano reventado que quedó sobre el tamiz; volumen de expansión de grano reventado (VEXP), que se calculó dividiendo el VTRV sobre el peso original de la muestra y se expresó en mL g^{-1}; y rendimiento de grano reventado (RGRV), que se expresó como un porcentaje de peso y se calculó dividiendo el PREV sobre el peso de la muestra y multiplicado por 100.

Análisis estadístico

Para detectar diferencias estadísticas entre tratamientos en cada una de las variables estudiadas se realizó un análisis de varianza combinado a través de ambientes y una prueba de comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$) mediante el procedimiento GLM del programa SAS versión 9.0 (SAS Institute, 2004).

El análisis de estabilidad para rendimiento y volumen de expansión de grano de las variedades se hizo mediante el modelo AMMI conforme a Crossa *et al.* (1990). Para el cálculo se empleó el programa de SAS descrito por Vargas y Crossa (2000), cuando se utiliza toda la información completa y efectos fijos. Los ambientes se clasificaron e identificaron las variedades sobresalientes para rendimiento de grano y de menor interacción con el ambiente con una gráfica biplot para precisar visualmente la estabilidad y respuesta equivalente entre genotipos y ambientes, de acuerdo con Ferreira *et al.* (2006) y Vargas y Crossa (2000).

Cuadro 1. Localización geográfica, precipitación, temperatura y tipo de suelo de los sitios de prueba de 10 variedades de amaranto evaluadas en 2014 y 2015 en Puebla, México.

Localidad	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (msnm)	P (mm)	T (ºC)	AO	Tipo de Suelo
Tochimizolco	18º 51' 49.91"	98º 37' 17.87"	2273	900	18.0	19	Regosol
Tecuanipan	19º 00' 19.17"	98º 25' 24.21"	2167	860	18.7	18	Arenosol
Calpan	19º 06' 44.60"	98º 24' 12.82"	2260	831	14.6	24	Arenosol
Chiautzingo	19º 13' 00.70"	98º 27' 21.37"	2344	802	16.8	36	Andosol
Serdán	19º 00' 07.45"	97º 27' 51.69"	2520	781	13.9	47	Regosol

Fuente: INEGI (2010) y SMN (2018). P: precipitación, T: temperatura, AO: años de observación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de varianza

El análisis de varianza combinado (Cuadro 2) mostró diferencias estadísticas significativas entre variedades (P ≤ 0.01) para todas las variables, excepto para LPAN, en la cual hubo diferencias entre variedades (P ≤ 0.05). Entre localidades también se detectaron diferencias estadísticas (P ≤ 0.01) para todas las variables, mientras que la interacción variedades × localidades (IVL) fue significativa (P ≤ 0.01), excepto para longitud de panoja (LPAN). La significancia en la IVL para seis de siete variables muestra que el ambiente de evaluación afectó de manera diferenciada a las variedades en la expresión de las variables evaluadas. García-Pereyra *et al.* (2011), al evaluar el rendimiento de genotipos de *A. cruentus* en tres ambientes en Durango, encontraron que hubo variación en la respuesta y que ésta estuvo en función del ambiente de evaluación.

El análisis de medias por localidad (Cuadro 3) indicó que Chiautzingo fue el sitio con el mayor rendimiento promedio (P ≤ 0.05) con 4028 kg ha^{-1}, mientras que la localidad de Tecuanipan presentó el rendimiento de grano más bajo (1709 kg ha^{-1}). Los sitios de Tochimizolco, Calpan y Serdán tuvieron rendimientos similares entre sí. Los rendimientos fueron superiores a los reportados por otros investigadores que evaluaron genotipos de *A. hypochodriacus* en valles altos; por ejemplo, Ramírez *et al.* (2011), al evaluar las variedades Laura, Gabriela y Revancha encontraron rendimientos promedio de 1493 kg ha^{-1} en San Miguel del Milagro, Tlaxcala y de 1619 kg ha^{-1} en Montecillo, Estado de México.

En el presente estudio, el sitio de Chiautzingo presentó, además de mayor rendimiento de grano (P ≤ 0.05), superior APTA (218.4 cm) y LPAN (74.3 cm), pero con menor PMILS (0.752 g). El experimento de Ciudad Serdán fue el que presentó (P ≤ 0.05) el mayor número de DAFM (115.7 d) en promedio; en las otras cuatro localidades esta variable fue similar, con un promedio de 86.7 d. Esto representa una diferencia de 29 d comparado con las otras localidades; este comportamiento se puede explicar porque el ensayo en Ciudad Serdán estuvo ubicado a una altitud de 2550 m, lo que causó temperaturas más bajas y alargó el ciclo del cultivo, comparado con los otros sitios de altitudes menores.

Se sabe que el aumento de altitud modifica la temperatura, ya que un incremento de 100 m reduce la temperatura en 0.6 ºC (Loomis y Connor, 1992). Menor temperatura modifica el desarrollo del amaranto; al respecto, Guo y Al-Khatib (2003) evaluaron la producción de biomasa de *A. retroflexus*, *A. palmieri* y *A. rudis* a diferentes temperaturas de día/noche y encontraron que de 25/20 a 15/10 ºC el crecimiento fue más lento, la producción de biomasa se redujo y la altura de planta fue menor. El aumento de temperatura y reducción de los días a floración se ha reportado en muchas plantas ornamentales (Vaid y Runkle, 2013). Además, en Ciudad Serdán se obtuvo el mayor PHL (88.3 kg hL^{-1}) y menores APTA (138.2 cm) y LPAN (47.4 cm). En volumen de expansión de grano, los sitios de Serdán y Calpan tuvieron el mayor VEXP y RGRV.

En el Cuadro 4 se presenta la comparación de medias por variedades. Se observa que las variedades sobresalientes en rendimiento (P ≤ 0.05) fueron C30, Laura, C2, CrPr y Nutrisol. La variedad con menor rendimiento fue

Cuadro 2. Cuadrados medios y significancia del análisis de varianza combinado y coeficiente de variación de las variables evaluadas en variedades de amaranto en cinco localidades del estado de Puebla, México en 2014 y 2015.

Variable	Cuadrados medios				CV (%)
	Localidades	Variedades	Var × Loc	Error	
REND	21,235,132.54 **	4,802,712.17 **	792,829.86 **	256,912.70	18.6
DAFM	5071.64 **	712.53 **	24.71 **	5.80	2.6
APTA	28,868.20 **	5711.60 **	410.18 **	161.28	7.2
LPAN	2926.78 **	116.36 *	81.02 ns	54.16	11.6
PHL	96.98 **	20.00 **	4.06 **	0.85	1.1
PMILS	0.03 **	0.08 **	0.00 **	0.00	2.7
VEXP	6.35 **	5.90 **	0.84 **	0.13	4.1
RGRV	50.73 **	45.37 **	5.23 **	1.52	0.4

**: Significativo con P ≤ 0.01, *: significativo con P ≤ 0.05, ns: no significativo, CV: coeficiente de variación, REND: rendimiento de grano, DAFM: días a floración masculina, APTA: altura de planta, LPAN: longitud de panoja, PHL: peso hectolítrico, PMILS: Peso de mil semillas, VEXP: volumen de expansión de grano reventado, RGRV: rendimiento de grano reventado.

Cuadro 3. Promedios por localidad de las variables evaluadas en 10 variedades de amaranto en cinco localidades del estado de Puebla, México en 2014 y 2015.

Localidad	REND (Kg ha^{-1})	DAFM (d)	APTA (cm)	LPAN (cm)	PHL (kg hL^{-1})	PMILS (g)	VEXP (mL g^{-1})	RGRV (%)
Chiautzingo	4028 a	87.0 b	218.4 a	74.3 a	86.7 b	0.752 d	8.6 b	84.3 c
Tochimizolco	2786 b	86.8 b	185.2 b	66.6 b	83.6 c	0.812 bc	8.2 c	83.0 d
Calpan	2650 b	86.2 b	186.3 b	65.6 b	87.2 b	0.840 a	9.0 a	86.3 a
Serdán	2422 b	115.7 a	138.2 d	47.4 c	88.3 a	0.802 c	9.2 a	85.8 ab
Tecuanipan	1709 c	86.7 b	155.2 c	62.3 b	87.4 b	0.825 ab	8.3 c	85.4 b
DSH (0.05)	364	1.7	9.1	5.3	0.7	0.015	0.3	0.9

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: diferencia significativa honesta, REND: rendimiento de grano, DAFM: días a floración masculina, APTA: altura de planta, LPAN: longitud de panoja, PHL: peso hectolítrico, PMILS: peso de mil semillas, VEXP: volumen de expansión de grano reventado, RGRV: rendimiento de grano reventado.

Cuadro 4. Promedios de las variables evaluadas en variedades de amaranto en cinco localidades de Puebla, México en 2014 y 2015.

Variedad	REND (kg ha^{-1})	DAFM (d)	APTA (cm)	LPAN (cm)	PHL (kg hL^{-1})	PMILS (g)	VEXP (mL g^{-1})	RGRV (%)
C30	3 439 a	98.7 ab	190.8 ab	66.7 a	87.3 ab	0.756 de	8.8 bc	85.5 ab
Laura	3 272 ab	95.9 c	177.8 bcd	64.1 a	87.2 ab	0.714 ef	8.7 bc	86.1 a
C2	3 020 abc	100.1 ab	198.9 a	64.4 a	88.0 a	0.898 ab	10.0 a	85.9 ab
CrPr	2 885 abc	96.3 bc	187.6 ab	62.1 a	86.8 b	0.825 c	9.0 b	85.4 ab
Nutrisol	2 847 abc	92.5 d	181.7 bc	66.0 a	86.2 b	0.709 f	8.1 dc	86.2 a
PQ_2	2 752 bc	92.1 d	170.9 cd	61.1 a	86.6 b	0.860 b	8.4 dc	84.6 b
Diego	2 670 c	91.4 d	181.8 bc	64.5 a	87.3 ab	0.876 ab	8.6 bc	85.4 ab
Gabriela	2 488 c	90.9 d	164.0 d	59.3 a	86.4 b	0.737 de	8.8 b	85.4 ab
Areli	2 435 c	91.8 d	184.2 abc	65.4 a	86.8 b	0.882 ab	8.8 b	85.1 ab
Revancha	1 382 d	75.1 e	128.6 e	58.8 a	83.7 c	0.805 c	7.6 e	80.2 c
DSH (0.05)	600	2.9	15.0	8.7	1.1	0.026	0.4	1.5

Medias con letras iguales en la misma columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). DSH: diferencia significativa honesta, REND: rendimiento de grano, DAFM: días a floración masculina, APTA: altura de planta, LPAN: largo de panoja, PHL: peso hectolítrico, PMILS: peso de mil semillas, VEXP: volumen de expansión de grano reventado, RGRV: rendimiento de grano reventado.

Revancha. Todas las variedades sobresalientes tuvieron un rendimiento superior al reportado a nivel nacional y al de Puebla que es de 1.0 y 1.3 t ha^{-1}, respectivamente (SIAP, 2017).

En DAFM las poblaciones C2 y C30 fueron las más tardías ($P \leq 0.05$) con 100.1 y 98.7 d (Cuadro 4), mientras que la variedad más precoz fue Revancha con 75.1 d. Hubo una diferencia máxima en precocidad entre variedades de 24.9 d. Se puede observar un segundo grupo de precocidad formado por las variedades Areli, Gabriela, Diego, PQ_2 y Nutrisol; sin embargo, se debe considerar que los DAFM se incrementaron en Ciudad Serdán por las razones antes expuestas, lo que provocó una media más alta en todas las variedades. La mayor APTA ($P \leq 0.05$) la obtuvieron las variedades C2, C30, CrPr y Areli.

Es común encontrar plantas altas en poblaciones nativas; en este sentido, Espitia *et al.* (2010) comentan que poblaciones nativas de *A. hypochondriacus* de la raza Azteca y Mixteca, en condiciones óptimas de crecimiento, suelen alcanzar una altura de planta superior a 3 m. Esto no es deseable debido a que una mayor altura de planta incrementa la posibilidad de acame, ruptura del tallo por el peso de la inflorescencia, y por lo tanto, pérdida de producción (Espitia *et al.*, 2010). La menor altura de planta a través de ambientes la obtuvo Revancha, con 128.6 cm. El comportamiento diferente de la variedad Revancha se explica

porque esta variedad fue seleccionada por su precocidad y porte bajo para cosecha mecánica y pertenece a la raza Mercado (Espitia *et al.*, 2010). Las poblaciones C2 y C30 presentaron el mayor rendimiento, APTA y DAFM, mientras que Revancha fue la menor con respecto a este comportamiento. Espitia *et al.* (2010) reportaron que en rendimiento de grano se ha encontrado una correlación positiva y estadísticamente significativa con altura de planta y días a floración.

En PHL las variedades C2, Diego C30 y Laura presentaron los mayores valores con 88.0, 87.3, 87.3 y 87.2 kg hL^{-1}, respectivamente. En PMILS las variedades que sobresalieron fueron C2, Areli y Diego (Cuadro 4).

En reventado de grano se observa que C2 fue la mejor variedad en VEXP ($P \leq 0.05$) con 10.0 mL g^{-1} (Cuadro 4). Un segundo grupo lo formó CrPr, C30, Gabriela, Areli, Laura y Diego, con promedios de VEXP entre 8.6 y 9.0 mL g^{-1}; por el contrario, la variedad Revancha presentó los valores más bajos en VEXP (7.6 mL g^{-1}). Moreno *et al.* (2015), al evaluar cuatro variedades en dos ambientes de producción, también reportaron que el ambiente afecta el volumen de expansión. Obtener un alto volumen de expansión es importante debido a que éste se asocia con un incremento de la palatabilidad, esto es porque los granos reventados con baja densidad son usualmente más suaves que los granos con alta densidad (Dofing *et al.*, 1990).

En relación con la eficiencia de reventado de grano, en el Cuadro 4 se observa que se formó un grupo de igual RGRV ($P \leq 0.05$), donde todas las variedades evaluadas están entre 85.1 y 86.2 %, excepto PQ_2 y Revancha que tuvieron una mayor proporción de grano sin reventar, con 15.8 y 19.8 %, respectivamente. Tavitas *et al.* (2011) reportaron rendimientos de grano reventado muy parecidos, entre 83.3 y 86.6 % en variedades de *A. cruentus*.

En términos generales, la mejor variedad por su REND y VEXP fue la población local C2; sin embargo, ésta tuvo algunos problemas agronómicos debido a que fue una de las variedades más tardías y de mayor altura de planta. Espitia *et al.* (2010) mencionan que uno de los problemas más fuertes en la producción de amaranto es que las plantas nativas son muy altas, lo que al combinarse con vientos y lluvias fuertes, provoca acame frecuente y una disminución de la producción; y proponen plantas precoces en lugares con sequías y heladas frecuentes. Las características sobresalientes de C2 pueden atribuirse al proceso de selección por parte de los agricultores en el ámbito local de Tochimilco. Este proceso de selección ha sido descrito en maíz por Gil-Muñoz *et al.* (2004), donde mostraron que los productores han creado o diseñado, por selección de plantas agronómicamente mejores y por contacto continuo con un ambiente en constante cambio, poblaciones nativas ampliamente adaptadas a las diversas condiciones ambientales bajo los cuales producen, por lo que estas poblaciones frecuentemente superan, o al menos igualan, a las variedades mejoradas.

Otras variedades que estuvieron en el grupo superior en rendimiento fueron Laura, Nutrisol y C30. Con respecto a VEXP, Laura y C30 están en el segundo grupo sobresaliente con 8.8 y 8.7 mL g^{-1}, respectivamente, pero Nutrisol tuvo un valor inferior con 8.1 mL g^{-1}. En RGRV Laura, Nutrisol y C30 son estadísticamente iguales (Cuadro 4). No obstante que Laura, Nutrisol y C30 no sobresalieron en las variables relacionadas con la expansión de grano reventado, estas variedades pueden ser recomendadas como una alternativa en la zona debido a que poseen mejores características agronómicas, aunque deben mejorarse para aumentar VEXP. Por lo anterior, la mejor variedad mejorada fue Laura, debido a que presentó buen rendimiento de grano y valor intermedio en VEXP; adicionalmente, en variables agronómicas presentó madurez y altura de planta intermedias.

Análisis de estabilidad

El análisis AMMI presentó diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en la variable REND y VEXP (Cuadro 5) en los efectos principales y en la interacción variedade × localidade (IVL). Adicionalmente, en REND fue significativo el CP1 y en VEXP los CP1 y CP2. El CP1 cubre el 78.9 % de la varianza de REND y el 68.3 % de la varianza de VEXP, por lo que fue adecuado construir las gráficas biplot de media de REND y VEXP por CP1 (Gauch, 1988). Entonces, se puede considerar que el modelo AMMI es apropiado para explicar la interacción, como se ha reportado en maíz (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2016) y en frijol (López-Salinas *et al.*, 2015).

En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados del análisis AMMI1 para Rendimiento y VEXP. En el eje de las ordenadas se presentan los valores del CP1 y en la abscisa la variable cuantitativa para localidades y variedades. Las localidades y variedades con valores cercanos a cero sobre el eje CP1 tienen baja interacción y contribuyen poco a la suma de cuadrados de la interacción variedade × localidade (IVL), por lo que se considera que presentan una mayor estabilidad (Crossa *et al.*, 1990; Ferreira *et al.*, 2006).

En rendimiento de grano y para el eje CP1 las variedades Laura y Diego contribuyeron poco a la IVL, por lo que fueron las más estables. Laura tuvo alto rendimiento, mientras que la variedad Diego tuvo rendimiento intermedio (Figura 1). Las variedades que tuvieron la mayor contribución a la IVL (menos estables) fueron Revancha, C2, C30 y Areli; sin embargo, C2 y C30 tuvieron alto rendimiento (Cuadro 4), mientras que la variedad Revancha presentó

Cuadro 5. Efectos aditivos e interacción multiplicativa del análisis de varianza para rendimiento de grano y volumen de expansión de grano para 10 variedades de amaranto a través de ambientes, con los tres primeros componentes del análisis de componentes principales.

Fuente de variación	GL	REND CM	Exp. (%)	Acu. (%)	VEXP CM	Exp. (%)	Acu. (%)
Localidades (Loc)	4	21,235,133 **			6.349 **		
Variedades (Var)	9	4,802,712 **			5.898 **		
Var × Loc	36	792,829 **			0.838 **		
Error	98	268,715			0.150		
Media general		2719 kg ha^{-1}			8.68 mL g^{-1}		
Términos AMMI							
PC1	12	22.464 **	78.7	78.7	20.615 **	68.3	68.3
PC2	10	4.447 ns	15.6	94.3	6.488 **	21.5	89.8
PC3	8	1.390 ns	4.9	99.2	2.333 ns	7.7	97.5

**: Significativo con P ≤ 0.01, *: Significativo con P ≤ 0.05, ns: no significativo, GL: grados de libertad, REND: rendimiento de grano, CM: cuadrado medio, Exp.: explicado, Acu.: acumulado, VEXP. volumen de expansión.

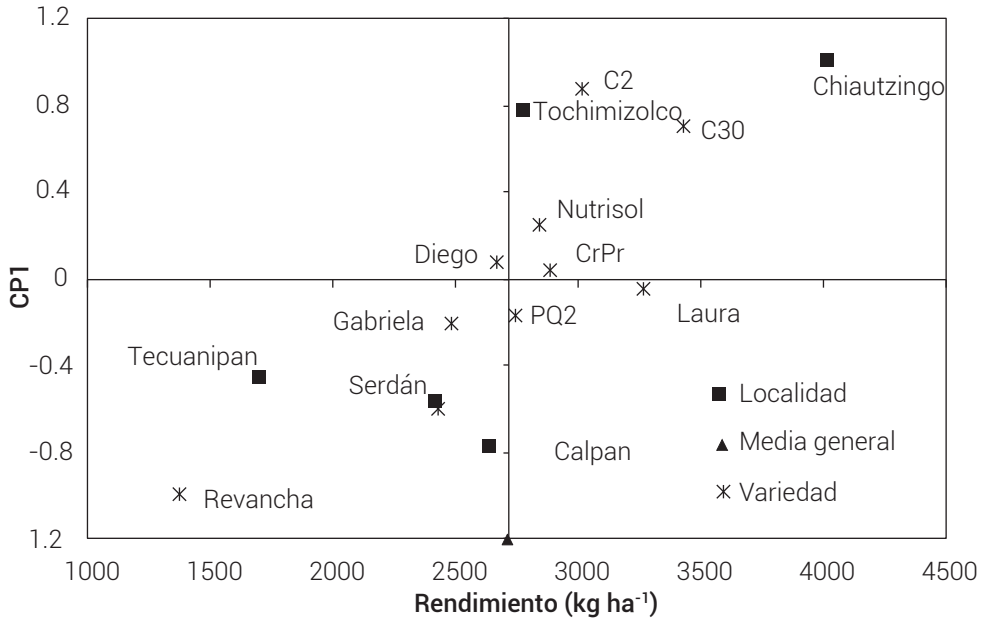


Figura 1. Rendimiento (kg ha^{-1}) y valores del componente principal 1 (CP1) para la interacción de 10 variedades de amaranto evaluadas en cinco localidades de Puebla, México durante 2014 y 2015.

bajo rendimiento y Areli rendimiento medio. Por último, PQ_2, Nutrisol y Gabriela presentaron estabilidad intermedia; el rendimiento de PQ_2 y Gabriela fue intermedio y el de Nutrisol fue alto.

Si se considera únicamente la variable REND y se desea tener variedades de alta productividad a través de un amplio rango de condiciones ambientales (Ferrerira *et al.*, 2006), la mejor variedad fue Laura debido a que mostró estabilidad y produjo alto rendimiento de grano en los diferentes ambientes de evaluación. En segundo lugar está Diego que fue estable, pero de rendimiento promedio. Las poblaciones C30 y C2 fueron inestables, pero con alto rendimiento y presentaron adaptación a las localidades Tochimizolco y Chiautzingo. Las poblaciones C2 y C30 fueron elegidas con base en su buen comportamiento en ensayos en varias localidades de la zona de Tochimilco, por lo que reflejan su adaptación específica a la zona en que se hizo la selección. En las localidades de Tochimizolco y Chiautzingo se obtuvieron los rendimientos más altos y las variedades C2 y C30 fueron las más tardías, lo que significa que las poblaciones locales aprovecharon el potencial productivo de estos sitios.

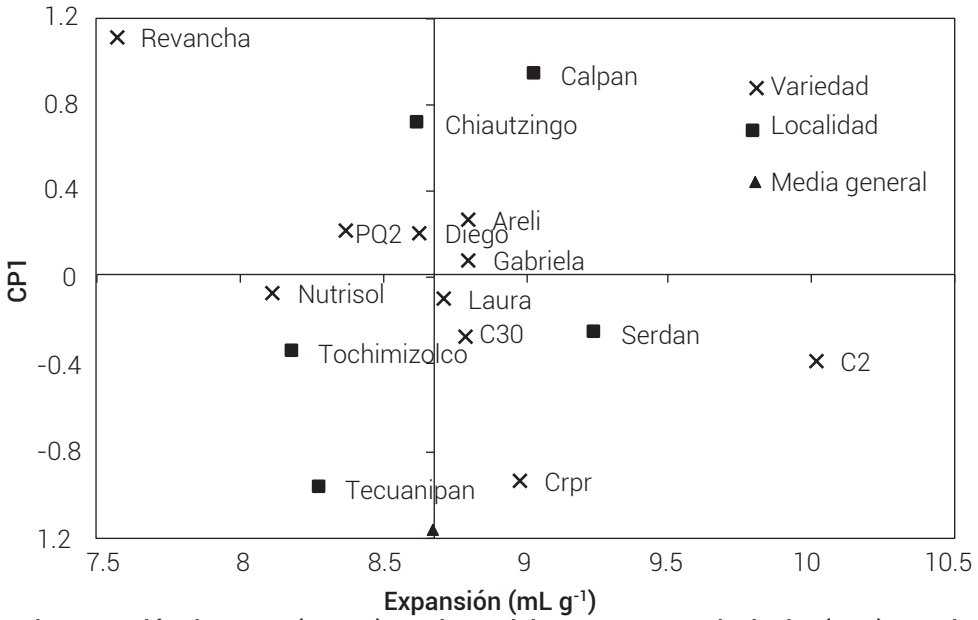


Figura 2. Volumen de expansión de grano (mL g^{-1}) y valores del componente principal 1 (CP1) para la interacción de 10 variedades de amaranto evaluadas en cinco localidades de Puebla, México durante 2014 y 2015.

El modelo AMMI también ha sido útil para identificar genotipos con adaptación específica a determinadas condiciones ambientales (Hongyu *et al*., 2014) para obtener los máximos rendimientos; lo anterior ha sido aprovechado para hacer recomendaciones para zonas específicas de variedades de frijol (López-Salinas *et al*., 2015) y maíz (Sánchez-Ramírez *et al*., 2016). La variedad agronómicamente inferior fue Revancha, debido a que presentó bajo rendimiento y fue inestable en los ambientes de evaluación. Por lo tanto, el modelo AMMI permitió identificar genotipos estables y genotipos adaptados a ambientes específicos (Crossa *et al*., 1990).

Todos los ambientes tuvieron valores altos en la IVL, pero los valores superiores fueron para Chiautzingo, Tochimizolco y Calpan, por lo que estos sitios pueden usarse para discriminar genotipos en un programa de mejoramiento de esta especie. En un segundo término en estabilidad estuvieron Ciudad Serdán y Tecuanipan. En rendimiento, el sitio más favorable fue Chiautzingo, mientras Tochimizolco, Calpan y Ciudad Serdán estuvieron muy cerca de la media general. El sitio con menor rendimiento fue Tecuanipan. En la Figura 1 se puede observar una interacción positiva entre el sitio de Chiautzingo y Tochimizolco con las poblaciones C2 y C30; también se aprecia que los sitios de Calpan, Ciudad Serdán y Tecuanipan presentan una relación positiva con Areli y Gabriela; esto indica que las variedades en cuestión serían más recomendables para estas zonas en cada caso. Sánchez-Ramírez *et al*. (2016) encontraron que algunos materiales de maíz con menor número de días a floración masculina se adaptaron mejor a condiciones restrictivas porque se acoplaron mejor al potencial del ambiente que genotipos más tardíos. En este caso las variedades Areli y Gabriela fueron las más precoces, después de Revancha.

En la variable VEXP las variedades que tuvieron los valores más cercanos a cero en el eje del CP1 fueron Gabriela, Nutrisol y Laura (Figura 2), y en consecuencia, fueron las más estables. La variedad Revancha tuvo alta ILV, por lo que se considera como la más inestable. Si se toman como criterios la estabilidad y la media de VEXP, las variedades se pueden clasificar como sigue: Laura y Gabriela fueron estables con VEXP muy próxima a la media general; C2 fue de estabilidad media y VEXP superior a la media general; C30, Areli y Diego fueron de estabilidad intermedia y VEXP cercano al promedio general; PQ_2 fue de estabilidad intermedia con VEXP bajo; Nutrisol se clasificó como estable de bajo VEXP y, finalmente, Revancha fue inestable y de bajo VEXP. No existió ninguna variedad clasificada como estable y de alto VEXP.

En VEXP las localidades de Ciudad Serdán y Tochimizolco tuvieron estabilidad intermedia, mientras que Tecuanipan, Calpan y Chiautzingo tuvieron alta contribución a la ILV. Los sitios con mayor VEXP fueron Calpan y Ciudad Serdán, mientras que Tochimizolco y Chiautzingo tuvieron valores intermedios y Tecuanipan tuvo el valor más bajo.

Al observar las Figuras 1 y 2 se aprecia que la localidad de Chiautzingo tuvo el máximo rendimiento de grano, pero no el máximo VEXP, sino que estuvo cerca de la media general. Por otro lado, las localidades de Ciudad Serdán y Calpan fueron las que tuvieron el máximo VEXP y presentaron

rendimiento de grano alrededor de la media general a través de ambientes. La falta de coincidencia entre rendimiento y capacidad de expansión ha sido reportado en maíz palomero por diversos investigadores. Broccoli y Burak (2004) detectaron ambientes favorables para rendimiento pero desfavorables para volumen de expansión. En el mismo tenor, Barrales-Domínguez y Torres-Hernández (1998) estudiando dos localidades contrastantes en rendimiento, encontraron mayores volúmenes de expansión de amaranto en la localidad de menor producción.

Las variedades con rendimiento de grano sobresaliente fueron C2, C30, Laura y Nutrisol, mientras que en VEXP sobresalió la población C2 y en segundo lugar estuvieron Laura y C30. La población C2 fue sobresaliente en ambas características, pero no siempre el genotipo de mayor rendimiento proporciona el mayor volumen de expansión. Broccoli y Burak (2004) encontraron en maíz palomero una correlación negativa baja y significativa entre rendimiento y capacidad de expansión, pero también reportan la existencia de genotipos con ambas cualidades; por lo tanto, proponen hacer selección simultánea, primero por capacidad de expansión y luego por rendimiento. En estabilidad de rendimiento la variedad Laura fue clasificada como estable, Nutrisol de estabilidad intermedia, mientras que las poblaciones C2 y C30 fueron inestables, pero presentaron adaptación específica a las localidades de Tochimizolco y Chiautzingo. La adaptación específica de las poblaciones C2 y C30 a Tochimizolco es porque fueron seleccionadas como sobresalientes para la zona del municipio de Tochimilco, por lo cual se pueden recomendar para esta zona.

En maíz se ha reportado que variedades de precocidad intermedia tienen mayor capacidad de adaptarse a condiciones ambientales restrictivas, en comparación con materiales tardíos (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2016). En características agronómicas las poblaciones C2 y C30 fueron tardías en madurez y tuvieron las plantas más altas; por otro lado, Laura y Nutrisol fueron de precocidad y altura de planta intermedia. En estabilidad del VEXP, Laura y Nutrisol fueron estables. La variedad Revancha resultó con características agronómicas y de procesamiento no deseables, pues presentó los valores más bajos en REND, VEXP, RGRV; además, se clasificó como inestable en REN y VEXP debido, probablemente, a que fue la variedad más precoz (DAFM de 75.1 d) y de menor altura de planta (128.6 cm), lo que no le permitió aprovechar completamente el potencial ambiental.

CONCLUSIONES

La mejor variedad mejorada para valles altos de Puebla fue Laura ya que presentó alto rendimiento de grano, aceptable VEXP, y estabilidad en rendimiento y VEXP; además, es de madurez y altura de planta intermedia. La población C2 puede ser una alternativa para la zona de Tochimizolco y Chiautzingo debido a que presentó alta adaptación a esta zona, expresada por su alto rendimiento de grano y mayor VEXP.

BIBLIOGRAFÍA

Barrales-Domínguez J. S. y L. Torres-Hernández (1998) Capacidad de reventado del grano de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.) producido en dos ambientes de temporal. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 4:63-66.

Becker H. C. and J. Léon (1988) Stability analysis in plant breeding. *Plant breeding* 101:1-23, https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1988.tb00261.x

Broccoli A. M. and R. Burak (2004) Effect of genotype x environment interactions in popcorn maize yield and grain quality. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2:85-91, https://doi.org/10.5424/sjar/2004021-64

Castro-Giráldez M., P. J. Fito, J. M. Prieto, A. Andrés and A. A. P. Fito (2012) Study of the puffing process of amaranth seeds by dielectric spectroscopy. *Journal of Food Engineering* 110:298-304, https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.012

Crossa J., H. G. Gauch and R. W. Zobel (1990) Additive main effects and multiplicative interaction analysis of two international maize cultivar trials. *Crop Science* 30:493-500.

Dofing S. M., M. A. Thomas-Compton and J. S. Buck (1990) Genotype x popping method interaction for expansion volume in popcorn. *Crop Science* 30:62-65, https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/pdfs/30/1/CS0300010062

Espitia R. E., C. Mapes S., D. Escobedo L., M. De la O O., P. Rivas V., G. Martínez T., L. Cortés E. 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. 201 p.

Escobedo-López D., A. V. Garay y L. G. Campos S. (2012) Formas de consumo del amaranto en México. *In*: Amaranto: Ciencia y Tecnología. Libro Científico No 2. E. Espitia R. (ed.). INIFAP/SINAREFI. México, D. F. pp:341-354.

Ferreira D. F., C. G. B. Demétrio, B. F. J. Manly, A. A. Machado and R. Vencovsky (2006) Statistical models in agriculture: biometrical methods for evaluating phenotypic stability in plant breeding. *Cerne* 12:373-388.

Gauch H. G. (1988) Model selection and validation for yield trials with interaction. *Biometrics* 44:705-715.

García-Pereyra J., C. G. S. Valdés-Lozano, G. Alejandre-Iturbide, I. Villanueva F. y O. G. Alvarado G. (2011) Interacción genotipo x ambiente y análisis de estabilidad en genotipos de amaranto (*Amaranthus* spp.). *Phyton* 80:167-173.

Gil-Muñoz A., P. A. López, A. Muñoz O. y H. López-Sánchez (2004) Variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) en el estado de Puebla, México: diversidad y utilización. *In*: Manejo de la Diversidad de los Cultivos en los Agroecosistemas Tradicionales. J. L. Chávez-Servia, J. Tuxill y D. I. Jarvis (eds.). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos. Cali, Colombia. pp:18-25.

Guo P. and K. Al-Khatib (2003) Temperature effects on germination and growth of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*), Palmer amaranth (*A. palmeri*), and common waterhemp (*A. rudis*). *Weed Science* 51:869-875, https://doi.org/10.1614/P2002-127

Hongyu K., M. García-Peña, L. Borgues A. and C. T. S. Dias (2014) Statistical analysis of yield trials by AMMI analysis of genotype × environment interaction. *Biometrical Letters* 51:89-102, https://doi.org/10.2478/bile-2014-0007

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010) Compendio de Información Geográfica Municipal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Aguascalientes. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/compendio.aspx (Junio 2017).

Loomis R. S. and D. J. Connor (1992) Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 538 p.

López-Salinas E., Ó. H. Tosquy-Valle, B. Villar-Sánchez, J. A. Acosta-Gallegos, J. R. Rodríguez-Rodríguez y P. Andrés-Meza (2015) Rendimiento y estabilidad de líneas mejoradas de frijol negro en Veracruz y Chiapas, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:173-181.

Morales G. J. C., N. Vázquez M. y R. Bressani C. (2014) El Amaranto: Características y Aporte Nutricio. 2da edición. Editorial Trillas. México, D. F. 131 p.

Moreno C. M. G., T. S. Herrera F., E. M. Licea A. y M. De la O O. (2015) Comparación entre el uso de aire caliente y microondas sobre la capacidad de reventado de semilla en cuatro variedades de Amaranto (*Amaranthus* sp). *Revista Ingeniantes* 1:40-44.

Ramírez V. M. L., E. Espitia R., A. Carballo C., R. Zepeda B., H. Vaquera H. y L. Córdova T. (2011) Fertilización y densidad de plantas en variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:855-866.

Ruiz H. V. C., M. de la O O., E. Espitia R., D. M. Sangerman-Jarquín, J. M. Hernández C. y R. Schwentesius R. (2013) Variabilidad cualitativa y cuantitativa de accesiones de amaranto determinada mediante caracterización morfológica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4:789-801.

Sánchez-Ramírez F. J., M. C. Mendoza-Castillo y C. G. Mendoza-Mendoza (2016) Estabilidad fenotípica de cruzas simples e híbridos comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana* 39:269-275.

SAS Institute (2004) SAS/STAT Version 9.1. User´s Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 5121 p.

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2017) Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA. Ciudad de México. http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119 (Abril 2017).

SMN, Servicio Meteorológico Nacional (2018) Información climatológica por estado. Estado de Puebla. Servicio Meteorológico Nacional. Ciudad de México. http://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=pue (Febrero 2018).

Tavitas F. L., M. Valle V. y L. Hernández A. (2011) Determinación de la calidad del grano reventado y contenido de aceite en cinco variedades de amaranto. Folleto Técnico No. 53. Campo Experimental Zacatepec, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F. 34 p.

Torres S. G., A. Trinidad S., T. Reyna T., H. Castillo J., A. Escalante E. y F. de León G. (2006) Respuesta de genotipos de amaranto a densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:307-312.

Vaid T. M. and E. S. Runkle (2013) Developing flowering rate models in response to mean temperature for common annual ornamental crops. *Scientia Horticulturae* 161:15-23, https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.06.032

Vargas H. M. y J. Crossa (2000) El Análisis AMMI y la Gráfica del Biplot en SAS. CIMMYT. México, D. F. 42 p.

Venskutonis P. R. and P. Kraujalis (2013) Nutritional components of amaranth seeds and vegetables: a review on composition, properties, and uses. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12:381-412, https://doi.org/10.1111/1541-4337.12021