



OBTENCIÓN DE LÍNEAS F₄ DE AMARANTO (*Amaranthus* spp.) A PARTIR DE CRUZAMIENTOS INTERVARIETALES

DEVELOPMENT OF F₄ LINES OF AMARANTH (*Amaranthus* spp.) FROM INTERVARIETAL CROSSES

Leticia Tavitas-Fuentes¹, Leonardo Hernández-Aragón¹, Micaela de la O-Olan^{2*}, Alfredo Josué Gámez-Vázquez³, Dora Ma. Sangermán-Jarquín² y José Luis Arellano-Vázquez²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatepec, Zacatepec, Morelos, México.

²INIFAP, Campo Experimental Valle de México, Texcoco, Estado de México, México. ³INIFAP, Campo Experimental Bajío, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia (micaelaolan@yahoo.com.mx)

RESUMEN

En el cultivo de amaranto (*Amaranthus* spp.) es importante desarrollar nuevas variedades con el ideotipo requerido por los productores, aptas para siembra y cosecha mecanizada, con porte intermedio para que resistan el acame, uniformidad en altura de planta, longitud de inflorescencia, maduración del grano, resistencia a enfermedades y al desgrane, alto potencial de rendimiento y buena calidad del grano. En México, el mejoramiento genético del género *Amaranthus* está sólo basado en selección masal, obteniendo materiales a través del fenotipo y no se ha explotado completamente la diversidad genética del cultivo; por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue obtener líneas avanzadas F₄ a través de cruzamientos simples para avanzar a una fase superior y contar con líneas promisorias y variedades adecuadas para los productores de amaranto. Con la técnica del cultivo de mini-plantas se realizaron cruza dirigidas de las que se obtuvieron 6404 semillas F₂, con las que se constituyeron grupos uniformes. En el ciclo primavera-verano (PV)-2017 se seleccionaron por el método masivo modificado 18 poblaciones segregantes F₃ y en el PV-2018 se continuó con el mismo método donde se obtuvieron ocho poblaciones segregantes F₄ con plantas de 1.30 a 1.65 m de altura, aptas para la cosecha mecanizada, panojas compactas, con mayor sincronía en la floración, lo que se tradujo en un mayor peso de grano por panoja (80 %). A través de la mejora de amaranto por recombinación genética es factible la generación de variedades modernas aptas para la cosecha mecanizada, con rentabilidad y sustentabilidad del cultivo.

Palabras clave: *Amaranthus* spp., cruzamientos intervarietales, mejoramiento genético.

SUMMARY

In the amaranth crop (*Amaranthus* spp.) it is important to develop new varieties with the ideotype required by producers, suitable for mechanized planting and harvesting, with medium plant height to resist lodging, uniformity in plant height, inflorescence length, grain maturation, resistance to diseases and shattering, high yield potential and good grain quality. In Mexico, the amaranth breeding is only based on mass selection, obtaining materials through the phenotype, and genetic diversity of the crop has not been fully exploited; therefore, the objective of this study was to obtain advanced F₄ lines through single crosses to advance to a higher phase and have promising lines and suitable varieties for amaranth producers. With the mini-plant cultivation technique, direct crosses were made, from which 6404 seeds in F₂ were obtained, and those were used to constitute uniform groups. During the

Spring-Summer (SS)-2017 agricultural cycle, 18 segregating F₃ populations were selected through the modified bulk method, and in SS-2018 the same method was continued where eight segregating F₄ populations were obtained with plants from 1.30 to 1.65 m in height, suitable for mechanized harvesting, compact panicles, with greater synchrony in flowering, which resulted in a higher grain weight per panicle (80 %). Through the improvement of amaranth by genetic recombination, the generation of modern varieties suitable for mechanized harvesting, with profitability and sustainability of the crop are feasible.

Index words: *Amaranthus* spp., genetic improvement, intervarietal crosses.

INTRODUCCIÓN

La superficie sembrada en México con amaranto y su volumen de producción son bajos, con apenas 2905 ha sembradas y 8166 t de grano cosechadas en 2020 (SIAP, 2021) debido, entre otros factores, a que los ecotipos y variedades disponibles actualmente no son aptas para la cosecha mecanizada, ya que poseen caracteres indeseables como poca homogeneidad en el crecimiento, con plantas altas de hasta 2.0 m, que propician el acame, madurez indeterminada y dehiscencia del glomérulo; estos factores dan lugar a bajos rendimientos y a una cosecha manual, que es ardua y poco rentable, pues presentan bajo índice de cosecha porque sus panojas producen reducida cantidad de grano y alta proporción de paja. Estas características contribuyen al desinterés de los productores por el cultivo, lo que ha condicionado que la superficie sembrada y el volumen de producción sea insuficiente para cubrir la demanda de este grano, por lo que las nuevas variedades deben tener menores costos de producción, ser homogéneas en porte y maduración, sin dehiscencia del glomérulo, de ciclo intermedio, con un mayor balance entre el número de florecillas pistiladas y estaminadas, que mejoren el rendimiento a través de un mayor número de granos por panoja, buena calidad de

reventado de grano y resistentes a enfermedades (Vaidya y Jain, 1987).

Para la generación de nuevas variedades que reúnan los caracteres de referencia, es necesario complementar los métodos de selección masal que se han aplicado en este cultivo, ampliando de forma dirigida la variabilidad genética con cruzamientos interespecíficos entre progenitores de *A. hypochondriacus*, *A. cruentus* y otras especies afines (Mwase *et al.*, 2014), que deriven en poblaciones y para su manejo mediante el método masivo modificado en generaciones tempranas (F₂-F₄) y selección genealógica en generaciones avanzadas (F₅-F_n), y así obtener líneas sobresalientes.

Los métodos de mejora genética que en México se han aplicado en amaranto son el de selección masal simple, que ha sido practicado durante miles de años y es tan sencillo como eliminar plantas indeseables o seleccionar las mejores dentro de una población, así como el de selección masal estratificada, semejante al de selección masal simple, pero dividido en parcelas o lotes (Espitia *et al.*, 2012). Con estos métodos se han modificado características fenotípicas de las plantas pero no se ha contribuido mucho al cambio genético; por ello, cuando estas variedades se cultivan en ambientes fuera de las áreas donde se desarrollaron, por lo general modifican su fenotipo, principalmente su ciclo vegetativo, altura de la planta que propicia el acame, presencia de ramificaciones de hábito indeterminado y dehiscencia del glomérulo que causa el desgrane, e irregularidad en la maduración del grano. Estas características repercuten en que el rendimiento sea menor al reportado en sus áreas de adaptación.

El mejoramiento del amaranto por recombinación genética tiene el objetivo de generar variedades mediante la integración de caracteres favorables en un solo genotipo. En la F₁ de cruzamientos interespecíficos entre *A. cruentus* y *A. hypochondriacus* se ha encontrado heterosis, pero este fenómeno aparentemente no existe en cruces intraespecíficas (Lehman *et al.*, 1991; Mujica *et al.*, 1997).

El género *Amaranthus* se caracteriza por su gran diversidad genética, lo que permite a los investigadores realizar estudios de taxonomía y nomenclatura para la caracterización del germoplasma (De la O *et al.*, 2012; Ruiz *et al.*, 2013); también facilita el estudio de su evolución en diferentes nichos ecológicos, por lo que permite detectar fuentes de resistencia a plagas y enfermedades u otras características agronómicas de interés para los productores, industriales y consumidores, caracteres que pueden aprovecharse para incorporarlos en otras variedades a través de cruzamientos (Brenner

et al., 2000). Así, en un mediano plazo a través de nuevas técnicas de cruzamientos, seguidas por la combinación de manejo poblacional en generaciones tempranas por el método masivo modificado y selección genealógica en generaciones avanzadas, es posible generar variedades con características adecuadas a las condiciones climáticas y edáficas de una determinada región o tipo de agricultura que se requiera, ya sea tradicional o tecnificada (Alejandre *et al.*, 2012). Sin duda, un aspecto que por muchos años había frenado el mejoramiento por recombinación de progenitores fue el desconocimiento de la técnica para la polinización artificial.

Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue la obtención de líneas avanzadas F₄ obtenidas de cruzamientos simples (A × B) para avanzar a una fase superior y contar con líneas promisorias para variedades adecuadas a los productores de amaranto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de progenitores

Se utilizaron materiales del Banco de Germoplasma de Amaranto del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y colectas de cultivares nativos del estado de Morelos (Cuadro 1), los cuales fueron sembrados durante el ciclo primavera-verano 2013 y 2014 en el Campo Experimental de Zacatepec, Morelos, México.

Los progenitores 1, 6, 7, 8, 10, 12 y 14 procedieron del estado de Morelos, México; 2 y 4 de los Estados Unidos de América; el 3 de los Himalayas, Nepal; el 5 de Europa, y 9, 11 y 13 de los Valles Altos de México.

Obtención y manejo de semillas F₀

Los cultivares seleccionados como progenitores masculinos se establecieron en condiciones de campo para la producción y recolección de polen, mientras que las variedades Revancha y Criollo de Amilcingo, que fueron usados tanto como progenitores femeninos como masculinos, se sembraron en charolas, al igual que los genotipos *A. hybridus* K 593 y *Amaranthus* sp. K340 de República Checa (Cuadro 2).

Establecimiento del lote de progenitores masculinos en el campo

Los progenitores masculinos se establecieron en campo para que experimentaran un desarrollo normal y buena producción de polen en los cruzamientos con las mini-plantas hembras (metodología desarrollada en

Cuadro 1. Características agronómicas de genotipos de amaranto seleccionados como progenitores en el programa de cruzamientos. Campo Experimental Zacatepec, Zacatepec, Morelos, México, PV-2013/2014.

No.	Progenitores	AP	CVE	TIP y COLP	PMIL
1	<i>A. cruentus</i> var. Morelos	1.10	93	Abierta, verde	0.882
2	<i>A. cruentus</i> var. Amont USA	1.30	89	Intermedia verde	0.863
3	<i>A. hypochondriacus</i> Nepal 2255 Rojo	1.00	93	Abierta, guinda	0.648
4	<i>A. hybridus</i> K593	0.95	89	Abierta, púrpura	0.690
5	<i>Amaranthus</i> sp. K340 Rep. Checa	0.90	89	Abierta, púrpura	0.704
6	<i>A. cruentus</i> CV Don Guiem	1.60	98	Compacta, verde	0.889
7	SL-2010 MOR 44	1.40	99	Abierta guinda	0.872
8	Naranja o canela, Mario Vidal Caporal	2.18	106	Intermedia amarilla	0.936
9	Sel. Revancha panoja verde, "Grano oro", Eleazar Cerezo	1.85	106	Compacta, verde	0.912
10	Amarilla "Vara dura", Temoac Humberto Mitsy	1.80	106	Compacta verde	0.952
11	Nutrisol	1.50	89	Abierta púrpura	0.543
12	Criollo de Amilcingo	2.17	96	Intermedia amarilla	0.925
13	Revancha	2.10	93	Compacta verde	0.954
14	Payasa	2.20	106	Intermedia púrpura/verde/rosa/dorada	0.927

AP: altura de planta (m), CVE: ciclo vegetativo (días), TIP: tipo panoja, COLP: color de panoja, PMIL: peso de mil semillas (g).

la época de los 1980s por el grupo de investigadores de Rodale Research Center, mencionado por Espitia *et al.*, 2010); se realizaron dos fechas de siembra con diferencia de 10 días para disponer de polen. Cada genotipo se aisló con una barrera física (surcos con maíz). Para la obtención de mini-plántulas de los progenitores femeninos, la siembra se efectuó en charolas en condiciones de invernadero en sustrato de cascarilla de arroz 50 % + cachaza 50 %.

Proceso de emasculación y polinización

Las plántulas de progenitores femeninos fueron trasplantadas a los 18 días en macetas de terracota de 20.3 cm, donde se pudieron desarrollar plantas con glomérulos de florecillas pistiladas y estaminadas. Las florecillas estaminadas fueron cuidadosamente emasculadas por las mañanas entre las 7:00 y 9:00 h. En el campo se obtuvo el polen de tres a cinco inflorescencias para realizar la polinización de las florecillas femeninas, lo que se realizó entre las 9:00 y las 11:00 h. Las semillas F_1 cosechadas de cada genotipo se conservaron en un cuarto frío.

Obtención y manejo de F_1

Se realizaron 68 cruzamientos con amarre de 30 a 50 %, obteniendo un total de 6402 semillas F_1 , con las que se formaron 19 grupos.

Las 19 nuevas poblaciones F_1 se sembraron en invernadero y posteriormente se trasplantaron a campo, donde cada población se aisló físicamente con una barrera de maíz, posteriormente la cosecha se efectuó de forma masiva en cada caso para obtener la semilla F_2 .

Manejo de las poblaciones F_2 para obtención de la generación F_3

El manejo de las primeras poblaciones segregantes se realizó en el ciclo P/V-2017, de las que se obtuvieron las poblaciones F_3 . La siembra se realizó en nueve surcos de 80 m de largo, en forma manual, en el lomo del surco con dos a tres semillas cada 10 cm. Posterior a la emergencia, se dejó una plántula cada 10 cm para selección por su morfología, respuesta a

Cuadro 2. Semilla obtenida de los 19 grupos F₁ de amaranto generado a través de cruza manual. Campo Experimental de Zacatepec, Morelos, México, ciclo I/P-2014.

Grupo	Progenitores	
	Femenino	Masculino
Zac-1-2014	<i>A. hybridus</i> K593 (roja)	Criollo Amilcingo
Zac-2-2014	Criollo Amilcingo (amarilla)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-3-2014	<i>A. cruentus</i> var. Amont USA (verde)	Nutrisol (púrpura)
Zac-4-2014	SL-2010-MOR-43 (amarilla)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-5-2014	<i>A. cruentus</i> Mexicano INTA (verde)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-6-2014	SL-2010-MOR-41 (amarilla)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-7-2014	Amarilla vara dura (verde)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-8-2014	Criollo de Amilcingo PV-2012 (amarilla)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-9-2014	Revancha (verde)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-10-2014	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)	Revancha (verde)
Zac-11-2014	<i>A. hypochondriacus</i> 2255 Nepal (guinda)	Criollo de Amilcingo (amarilla)
Zac-12-2014	Criollo de Amilcingo (amarilla)	<i>Amaranthus</i> sp. K340 Rep Checa (guinda)
Zac-13-2014	<i>A. cruentus</i> var. Morelos (guinda)	Criollo de Amilcingo
Zac-14-2014	<i>A. cruentus</i> 93 CV Don León (verde)	SL-2010 MOR-44 (púrpura)
Zac-15-2014	<i>A. cruentus</i> CV Don Guiem (verde)	SL-2010 MOR-44 (púrpura)
Zac-16-2014	Amarilla Vara dura. Temoac (verde)	Nutrisol (púrpura)
Zac-17-2014	Naranja o canela. Mario Vidal Caporal (amarilla)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-18-2014	Sel. Revancha panoja verde, grano oro (verde)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)
Zac-19-2014	Dorado (amarillo)	<i>A. hybridus</i> K593 (púrpura)

plagas y enfermedades, además de los caracteres de inflorescencias, granos y rendimiento (CP-SNICS, 2006).

En madurez del grano se realizaron actividades inherentes al método masivo modificado, descartando plantas enfermas o con características indeseables, crecimiento irregular de plantas o de sus inflorescencias al desgrane; seleccionando aquellas con inflorescencias sanas y buenas proporciones de florecillas femeninas versus masculinas, para lograr una tasa de polinización aceptable; selección de las plantas con altura intermedia y resistencia al acame, con ciclo vegetativo de precoz a intermedio, con regularidad de las ramificaciones de las plantas y panojas, con aceptable producción de grano, tamaño e indehiscencia de éste, descartando inflorescencias con altos volúmenes de tamo o basura. De las plantas preseleccionadas en cada población en madurez del grano se efectuó el corte de las panojas en forma individual. Se pesaron los granos de cada panoja;

al final se mezcló el grano correspondiente de las plantas seleccionadas por población, dando como resultado la obtención de las poblaciones F₃ a través de método masivo modificado.

En cada una de las poblaciones obtenidas en la F₄ fue realizada la selección de plantas sanas con adecuado fenotipo morfológico, consistente en altura intermedia y buen tipo de planta, con resistencia al acame, ciclo vegetativo de precoz a intermedio, regularidad de las ramificaciones de las plantas y de las panojas, aceptable producción de grano de buen tipo, tamaño e indehiscencia para resistencia al desgrane, descartándose aquellas plantas en cuyas inflorescencias se detectaron altos volúmenes de tamo debido a la baja tasa de polinización.

Análisis de la información

Se obtuvieron estadísticas descriptivas de cada

población para los caracteres cuantitativos altura de la planta (AP, m), grosor de tallo (GT, cm), longitud de la panoja (LPA, cm) y porcentaje de grano; y los cualitativos obtenidos de acuerdo con la guía de la UPOV (2008), tales como color de tallo y color de panoja. Posteriormente, se realizó una comparación entre las poblaciones obtenidas en F_3 con las obtenidas en F_4 para porcentaje total de grano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 19 poblaciones segregantes F_2 , las poblaciones ZAC-14-14 y ZAC-19-14 fueron descartadas por presentar baja aptitud combinatoria de sus progenitores, y características indeseables como alta incidencia de enfermedades. De las 17 poblaciones restantes se obtuvo la generación F_3 (Cuadro 3), por lo que el método de selección está en función de los objetivos del mejoramiento (Espitia-Rangel, 1994), las características del material de inicio y de los recursos disponibles.

En la variable de peso de semillas, las panojas produjeron diferentes cantidades de semillas, donde destacaron las poblaciones 1, 2, 3, 4, 6, 10 y 14, ya que produjeron mayores pesos de grano que de tamo, aunque en las poblaciones restantes sucedió lo contrario, pero sus panojas correspondieron a plantas con altura intermedia, de ciclo precoz y buen tamaño de panojas, por ello no se descartaron, esperando que en la siguiente generación se presente posible segregación para mayor peso de grano (Cuadro 3).

Obtención de poblaciones F_4

De las 17 poblaciones segregantes F_3 , sembradas en 2017, 10 poblaciones fueron descartadas por su notable segregación hacia características indeseables e incidencia de diferentes enfermedades, por lo que de las siete poblaciones restantes se obtuvo la generación F_4 por sus características agronómicas deseables. Aunque el porte de algunas plantas sobrepasó el límite del ideotipo deseado (1.6 m), presentaron tallos gruesos o panojas deseables (compactas y con buena cantidad de grano). Para ello, se seleccionaron plantas de las poblaciones 1, 7, 8, 9, 10, 11 y 13. Es notable que en la mayoría de las plantas de las poblaciones F_4 se registró un aumento significativo del porcentaje de grano, en comparación con los granos obtenidos en las poblaciones F_3 en 2017.

En el Cuadro 4 se muestran las características de la población ZAC-1-14-0ma-58B-16B (F_4), de la cual se seleccionaron 16 plantas. Se presentaron tallos delgados, en su mayoría rayados, firmes y resistentes al acame, con alturas de 1.2 a 1.7 m, panojas compactas y de buena longitud (40 a 65 cm), la mayoría de color vino. El mayor porcentaje de grano fue de 85.9 % y el menor de 50.5 %.

De la población ZAC-7-14-0ma-10B-8B (F_4) se seleccionaron ocho plantas, como se presenta en el Cuadro 5, las plantas presentaron alturas de 1.4 a 1.6 m, todas con tallos rayados, con panojas compactas, en su mayoría de color vino. El mayor porcentaje de grano fue de 85.0 % y el menor de 50 %, lo cual concuerda con lo mencionado

Cuadro 3. Poblaciones segregantes F_3 obtenidas a través del método de selección masivo modificado, Campo Experimental Zacatepec, ciclo PV-2017.

Pob.	Genealogía	DM	PS (g)	Pob.	Genealogía	DM	PS (g)
1	ZAC-1-14-0ma-58B	76-98	707.7	10	ZAC-10-14-0ma-42B	76-98	339.7
2	ZAC-2-14-0ma-15B	82	105.1	11	ZAC-11-14-0ma-21B	102	19.5
3	ZAC-3-14-0ma-20B	97	77.82	12	ZAC-12-14-0ma-21B	97	40.1
4	ZAC-4-14-0ma-40B	82	179.9	13	ZAC-13-14-0ma-20B	102	16.9
5	ZAC-5-14-0ma-20B	97	38.4	14	ZAC-15-14-0ma-31B	82	230.8
6	ZAC-6-14-0ma-29B	82	201.4	15	ZAC-16-14-0ma-19B	102	29.7
7	ZAC-7-14-0ma-10B	94	19.6	16	ZAC-17-14-0ma-19B	102	38.3
8	ZAC-8-14-0ma-11B	94	23.2	17	ZAC-18-14-0ma-10B	105	20.7
9	ZAC-9-14-0 ma-14B	94	53.5				

Pob: número de población, DM: días a madurez, PS: peso de semilla.

por Weber y Kauffman (1990; Com.Pers.)¹ sobre los requerimientos de ideotipos con mayor porcentaje de grano.

Las características de la población Zac-8-14-0ma-14B-28B (F₄), se muestran en el Cuadro 6. La altura de planta fluctuó de 1.1 a 1.6 m, con tallos rayados con resistencia al acame con grosor mediano en su mayoría y el resto grueso. Las panojas fueron compactas, con longitudes de 45 a 65 cm, de las cuales 21 presentaron color rosa y el resto color vino. El mayor porcentaje de grano fue de 87.5 % y el menor de 70 %.

Las características de la población ZAC-9-14-0ma-14B-26B (F₄) se muestran en el Cuadro 7. La altura de planta fluctuó de 1.4 a 1.6 m, la mayoría de tallos fueron de color amarillos y otros presentaron rayas, ocho de grosor delgado y 18 de grosor mediano. La longitud de panoja osciló de 45 a 70 cm, de las cuales 10 fueron de tono rosa, 11 verde y cinco de color vino. El mayor

¹Weber F. L and C. S. Kauffman (1990) Plant breeding and seed production. In: Proceedings of the 4th National Amaranth Symposium: Perspectives on Production, Processing and Marketing. American Amaranth Institute. Minneapolis, Minnesota, USA. p:115.

porcentaje de grano fue de 83.2 y el menor de 64.9 %.

Las características de la población ZAC-10-14-0ma-42B-23B (F₄) se observan en el Cuadro 8, donde se obtuvieron alturas de planta de 1.3 a 1.6 m, cinco plantas presentaron tallos lisos y el resto fueron tallos rayados, 20 plantas con grosor mediano, dos delgados y uno grueso. Las panojas compactas, con longitudes de 40 a 55 cm, 12 de color vino, cuatro verdes y siete de color rosa.

En el Cuadro 9 se muestran las variables de la población F₄ZAC-11-14-0ma-21B-14B, 14 plantas fueron seleccionadas por su altura de 1.4 a 1.60 m, de las cuales seis tuvieron tallos rayados y ocho lisos, la mayoría fueron gruesos. Panojas compactas de 40 a 80 cm de longitud, 11 mostraron color verde y tres color vino, con un porcentaje de grano mayor de 81.6 %.

En el Cuadro 10 se muestran las variables de la población F₄ZAC-13-14-0ma-20B-6B (6 plantas seleccionadas), las que presentaron alturas de 1.5 a 1.6 m, cinco mostraron tallos rayados y uno liso, con grosor de tallo en su mayoría mediano. Las panojas fueron compactas (Ruiz *et al.*, 2018), de longitudes de 45 a 65 cm y todas de color rosa, con el

Cuadro 4. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-1-14-0ma-58B-16B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	40	Vino	71.2
2	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	57	Vino	51.1
3	1.3	Verde/ rayas guinda	Delgado	55	Vino	76.7
4	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	55	Vino	68.5
5	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	55	Vino	76.7
6	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	65	Vino	80.6
7	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	55	Vino	72.8
8	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	56	Vino	85.9
9	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	50	vino	70.2
10	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	42	Vino	74.5
11	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	58	Vino	81.8
12	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	65	Vino	78.8
13	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	44	Vino	74.5
14	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	50	Vino	82.4
15	1.7	Verde	Delgado	60	Verde	77.7
16	1.4	Verde	Delgado	57	Verde	50.5

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

Cuadro 5. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-7-14-0ma-10B-8B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.6	Amarillo con rayas guinda	Mediano	60	vino	50
2	1.5	Amarillo con rayas guinda	Delgado	55	Vino	85.0
3	1.6	Amarillo con rayas guinda	Delgado	55	Vino	84.3
4	1.5	Amarillo con rayas guinda	Delgado	60	Vino	84.1
5	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	64	Vino	81.7
6	1.4	Amarillo con rayas guinda	Mediano	70	Vino	73.1
7	1.6	Amarillo con rayas guinda	Mediano	67	Vino	81.6
8	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Rosa	72.5

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

mayor porcentaje de grano de 80.7 % y 71.1 % el menor.

La comparación del comportamiento de las poblaciones segregantes seleccionadas F₃ y F₄ se puede observar en la Figura 1. En la población F₃ se seleccionaron 409 plantas, cuya producción de grano fue menor al 50 %; en cambio, en la población F₄ se cosecharon 122 plantas, aunque el número fue menor a la población anterior, la producción de grano aumentó considerablemente del 60 al 80 %.

Con respecto al ciclo vegetativo, en la población F₃ los días a madurez oscilaron en un intervalo de 78 a 102 días, mientras que las plantas de las poblaciones F₄ presentaron mayor precocidad, ya que presentaron un periodo de 78 a 92 días a la madurez. Para las condiciones del estado de Morelos, México se requiere de este tipo de genotipos, ya que el ciclo regular de lluvias que se registra es de junio a septiembre.

De acuerdo con los resultados obtenidos, con el manejo poblacional (F₂-F₄), en la última generación se puede considerar que se han seleccionado plantas con un resultado favorable para la obtención de variedades modernas (Tavitas *et al.*, 2015), ya que se obtuvieron plantas con alturas de entre 1.30 y 1.65 m, aptas para la cosecha mecanizada, con un mejor balance de florecillas pistiladas *versus* estaminadas en sus inflorescencias, lo que se tradujo en una tasa mayor de polinización, y por lo tanto, un mayor volumen y peso de grano, lo cual coincide con lo encontrado por Maughan *et al.* (2011). Estos avances indican que a través de la mejora genética del amaranto por recombinación genética dirigida, es

factible la generación de variedades modernas con ideotipos aptos para cosecha mecanizada, con un mayor equilibrio entre florecillas pistiladas *versus* estaminadas en sus inflorescencias (Kulakow y Jain, 1987) y con mayor potencial de rendimiento con respecto a las variedades actuales (Kauffman, 1990).

Como procedimiento global, puede mencionarse que de los 65 cruzamientos simples (A × B) efectuados en 2013, se obtuvieron 19 grupos con un total de 6402 semillas F₀. De las 19 poblaciones F₂ sembradas en 2017, dos de ellas fueron descartadas totalmente por baja aptitud combinatoria de sus progenitores. De las 17 poblaciones restantes se obtuvo la generación F₃, constituida por 409 plantas. De las 18 poblaciones F₃ manejadas en 2018 fueron descartadas 12 de éstas, y de las siete poblaciones vigentes sólo se obtuvieron 122 plantas en la generación (F₄).

CONCLUSIONES

La hibridación es un método efectivo de mejoramiento genético en amaranto, debido al aprovechamiento de la variabilidad genética disponible en forma natural y constituye el primer ensayo en México sobre éste método de mejora. En F₄ se obtuvieron líneas avanzadas de amaranto con alturas de 1.45 a 1.60 m, con tallos resistentes al acame lo que permite la cosecha mecanizada, aprovechando la variabilidad generada mediante recombinación genética a través de la hibridación. En la F₄ se obtuvieron mayores porcentajes de grano de entre 60 y 80%.

Cuadro 6. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-8-14-0ma-14B-28B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Rosa	82.6
2	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Rosa	83.6
3	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Rosa	84.3
4	1.4	Amarillo/ rayas rosa	Mediano	60	Rosa	82.7
5	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	65	Rosa	82.3
6	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	60	Rosa	81.8
7	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Rosa	83.9
8	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	52	Rosa	84.8
9	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	62	Rosa	79.2
10	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Grueso	60	Rosa	83.5
11	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	52	Rosa	83.4
12	1.42	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	55	Rosa	82.1
13	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Rosa	71.7
14	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Rosa	82.7
15	1.2	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Rosa	74.9
16	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	60	Rosa	74.3
17	1.6	Amarillo/ rayas guinda	Grueso	65	Rosa	82.9
18	1.1	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Rosa	87.5
19	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Rosa	81.8
20	1.3	Amarillo/ rayas rosa	Mediano	50	Rosa	82.8
21	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Rosa	84.3
22	1.4	Guinda/ rayas amarillo	Mediano	55	Vino	82.7
23	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Delgado	45	Vino	83.2
24	1.3	Amarillo/ rayas guinda	Grueso	55	Vino	82.9
25	1.4	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	50	Vino	83.2
26	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	60	Vino	80.1
27	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	60	Vino	81.1
28	1.4	Amarillo/rayas guinda	Mediano	55	Vino	70.0

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

Cuadro 7. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-9-14-0ma-14B-26B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.6	Amarillo	Delgado	57	Rosa	83.2
2	1.5	Verde	Mediano	55	Rosa	64.9
3	1.5	Amarillo	Delgado	50	Rosa	78.1
4	1.5	Amarillo	Delgado	45	Verde	81.7
5	1.6	Verde pálido	Mediano	70	Verde	78.5
6	1.6	Verde pálido	Mediano	57	Verde	80.4
7	1.5	Amarillo	Delgado	55	Rosa	79.9
8	1.6	Amarillo	Mediano	50	Rosa	83.2
9	1.4	Amarillo	Delgado	55	Rosa	78.9
10	1.5	Amarillo	Delgado	45	Verde	80.7
11	1.5	Amarillo	Mediano	65	Rosa	71.4
12	1.5	Amarillo	Mediano	45	Verde	77.2
13	1.6	Amarillo con rayas guindas	Mediano	50	Vino	82.3
14	1.6	Amarillo	Mediano	55	Verde	82.5
15	1.5	Amarillo	Mediano	55	Verde	78.4
16	1.4	Amarillo	Mediano	55	Vino	71.2
17	1.6	Amarilla	Mediano	55	Verde	73.3
18	1.5	Amarillo con rayas guindas	Mediano	62	Vino	81.1
19	1.6	Amarillo	Mediano	50	Verde	83.1
20	1.4	Amarillo con rayas guinda	Delgado	45	Rosa	77.9
21	1.6	Amarillo	Mediano	45	Verde	70.8
22	1.6	Amarillo	Delgado	45	Verde	76.6
23	1.4	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Rosa	64.6
24	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Rosa	73.1
25	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	72.2
26	1.6	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	73.9

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

Cuadro 8. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-10-14-0ma-42B-23B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.40	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Vino	74.40
2	1.45	Amarillo	Mediano	45	Verde	71.56
3	1.35	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Rosa	75.87
4	1.45	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Rosa	68.96
5	1.53	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Rosa	71.04
6	1.60	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Vino	75.44
7	1.50	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Vino	76.23
8	1.30	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Rosa	77.43
9	1.55	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	78.56
10	1.50	Amarillo	Mediano	45	Verde	79.77
11	1.65	Amarillo con rayas guinda	Grueso	50	Vino	73.97
12	1.25	Amarillo con rayas guinda	Mediano	40	Vino	77.53
13	1.55	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	67.22
14	1.55	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Vino	76.51
15	1.45	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	76.26
16	1.45	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Rosa	77.36
17	1.55	Amarillo	Mediano	50	Rosa	69.24
18	1.40	Amarillo con rayas guinda	Mediano	40	Vino	75.64
19	1.40	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Vino	76.35
20	1.45	Amarillo con rayas guinda	Delgado	45	Rosa	75.34
21	1.50	Amarillo	Mediano	45	Verde	69.73
22	1.30	Amarillo	Delgado	45	Verde	79.45
23	1.60	Amarillo con rayas guinda	Mediano	55	Vino	83.59

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

BIBLIOGRAFÍA

- Alejandre I. G., C. G. S. Valdés L. y J. García P. (2012) Selección y adaptación de variedades criollas de amaranto (*Amaranthus cruentus* L.) en el Noreste de México. In: Amaranto: Ciencia y Tecnología. Libro Científico No. 2. E. Espitia R. (ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F. pp:249-256.
- Brenner D. M., D. D. Baltensperger, P. A. Kulakow, J. W. Lehmann, R. L. Myers, M. M. Slabbert and B. B. Sleugh (2000) Genetic resources and breeding of *Amaranthus*. *Plant Breeding Review* 19:227-285, <https://doi.org/10.1002/9780470650172.ch7>
- CP-SNICS, Colegio de Postgraduados-Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (2006) Manual Gráfico para la Descripción Varietal en Amaranto (*Amaranthus* spp.). Colegio de Postgraduados-Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Montecillo, Estado de México. 43 p.
- De la O O. M., E. Espitia R., A. V. Ayala G., J. M. Hernández C., J. L. Arellano V. y V. C. Ruiz H. (2012) Caracterización morfológica de germoplasma para grano de amaranto (*Amaranthus* spp.). In: Amaranto: Ciencia y Tecnología. Libro Científico No. 2. E. Espitia R. (ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F. pp:165-181.
- Espitia-Rangel E. (1994) Breeding of grain amaranth. In: *Amaranth Biology, Chemistry and Technology*. O. Paredes-López (ed.). CRC

Cuadro 9. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-11-14-0ma-21B-14B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.6	Amarillo	Mediano	55	Verde	81.6
2	1.5	Amarillo	Mediano	45	Verde	75.2
3	1.6	Amarillo	Grueso	60	Verde	63.7
4	1.5	Amarillo	Grueso	45	Verde	60.7
5	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Verde	71.5
6	1.5	Amarillo/ rayas guinda	Mediano	45	Vino	76.8
7	1.6	Verde	Grueso	70	Verde	62.5
8	1.4	Amarillo	Mediano	40	Verde	68.3
9	1.5	Verde/ rayas guinda	Grueso	65	Verde	71.1
10	1.4	Amarillo/rayas guinda	Mediano	50	Vino	69.4
11	1.6	Verde	Grueso	65	Verde	67.7
12	1.5	Verde	Grueso	65	Verde	69.2
13	1.6	Verde/ rayas guinda	Grueso	75	Verde	77.3
14	1.4	Verde/ rayas guinda	Grueso	80	Vino	67.5

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

Cuadro 10. Características de las plantas seleccionadas en la población ZAC-13-14-0ma-20B-6B (F₄), ciclo P/V-2018, Zacatepec, Morelos.

Planta	AP	CT	GT	LPA	CPA	GR
1	1.6	Verde con rayas guinda	Mediano	60	Rosa	76.0
2	1.6	Amarillo con rayas guinda	Grueso	65	Rosa	71.8
3	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Rosa	73.7
4	1.5	Vino	Mediano	50	Rosa	71.1
5	1.5	Amarillo con rayas guinda	Mediano	45	Rosa	80.7
6	1.6	Amarillo con rayas guinda	Mediano	50	Rosa	75.1

AP: altura de planta (m), CT: color de tallo, GT: grosor de tallo, LPA: longitud de panoja (cm), CPA: color de panoja, GR: grano (%).

Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:23-38.

Espitia R. E., D. Escobedo L. y M. Aguilar D. (2012) Estrategia y metodología para el mejoramiento genético de amaranto. *In: Amaranto Ciencia y Tecnología. Libro Científico No. 2. E. Espitia R. (ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F. pp:227-247.*

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. 200 p.

Kauffman S. C. (1990) Observaciones sobre las investigaciones

preliminares para el desarrollo de variedades mejoradas de amaranto de grano en cinco países. *In: Amaranthus spp. Su Cultivo y Aprovechamiento. A. Trinidad S., F. Gómez L. y G. Suárez R. (eds.). Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. pp:280-288.*

Kulakow P. and S. Jain (1987) Genetics of grain amaranths. 4. Variation in early generation response to selection in *Amaranthus cruentus* L. *Theoretical and Applied Genetics* 74:113-120, <https://doi.org/10.1007/BF00290093>

Lehman J. W., R. L. Clark and K. J. Frey (1991) Biomass heterosis and combining ability in interspecific and intraspecific rating of grain amaranths. *Crop Science* 31:1111-1116, [https://doi.org/10.2391/0885-1724\(199107\)31:1111:1](https://doi.org/10.2391/0885-1724(199107)31:1111:1)

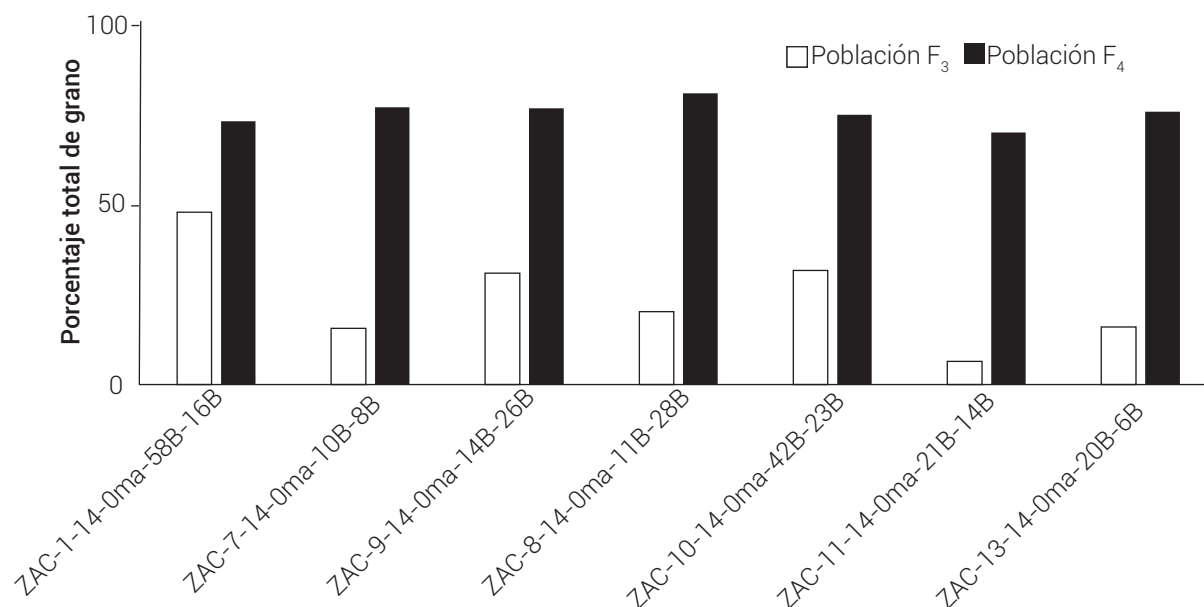


Figura 1. Porcentaje total del grano obtenido en F₃ y F₄ de las poblaciones seleccionadas.

- org/10.2135/cropsci1991.0011183X003100050004x
- Maughan P. J., S. M. Smith, D. J. Fairbanks and E. N. Jellen (2011) Development, characterization, and linkage mapping of single nucleotide polymorphisms in the grain amaranths (*Amaranthus* sp.). *The Plant Genome* 4:92-101, <https://doi.org/10.3835/plantgenome2010.12.0027>
- Mujica S. A., M. Berti D. y J. Izquierdo (1997) El Cultivo del Amarantho (*Amaranthus* spp.). Producción, Mejoramiento Genético y Utilización. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 145 p.
- Mwase W. F., N. Kachiguma, D. Manduwa and M. F. A. Maliro (2014) Agromorphological diversity of *Amaranthus* species in Central Malawi. *International Journal of AgriScience* 4:235-241.
- 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, <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i5.1176>
- Ruiz H. V. C., J. P. Legaria S., J. Sahagún C. y M. De la O O. (2018) Variabilidad

- genética en algunas especies cultivadas y silvestres de amaranto. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9:405-416, <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1081>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2021) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Noviembre 2021).
- Tavitas F. L., L. Hernández A., A. Isidro O. y R. A. Urbina R. (2015) Técnicas para la realización de cruces en amaranto. Folleto Técnico No. 96. Campo Experimental Zacatepec, INIFAP. Zacatepec, Morelos. 44 p.
- UPOV, Unión Internacional para la Protección de Obtenciones Vegetales (2008) Guía para la descripción varietal en amaranto. Documento TG/247/1. Unión Internacional para la Protección de Obtenciones Vegetales. Ginebra, Suiza. 187 p.
- Vaidya K. R. and S. K. Jain (1987) Response to mass selection for plant height and grain yield in amaranth (*Amaranthus* spp). *Plant Breeding* 98:61-64, <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1987.tb01091.x>