CARACTERIZACIÓN Y RENDIMIENTO DE SEMILLA DE PROGENITORES FEMENINOS DE HÍBRIDOS SIMPLES Y TRILINEALES DE SORGO

CHARACTERIZATION AND SEED YIELD OF FEMALE PARENTS OF SINGLE AND THREE-WAY SORGHUM HYBRIDS

Cesar Rebollar-Avila[1], Leopoldo E. Mendoza-Onofre[1]*, Ma. Eugenia Cisneros-López[2], Hilda V. Silva-Rojas[1] y Leobigildo Córdova-Téllez[1]

[1]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. [2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Rio Bravo, Tamaulipas, México.

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

RESUMEN

Como consecuencia del reciente registro de líneas parentales B y R de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] adaptados a los Valles Altos de México, se requiere desarrollar la tecnología de producción de la semilla híbrida respectiva, siendo éste el objetivo del presente trabajo. En Montecillo, México, en el año 2015 se caracterizaron morfológica y fenológicamente cuatro líneas A y 10 cruzas A × B no isogénicas (hembras androestériles de híbridos simples y trilineales, respectivamente). El rendimiento de semilla híbrida (RSH) se evaluó bajo las relaciones de surcos hembra:macho 4:2, 8:2, 12:2 y 16:2. La línea R19 fue el macho común. Las variables fenológicas y morfológicas se compararon mediante la t de Student; el RSH se evaluó en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones. En la línea macho se registraron los días a floración y la producción de polen diario y total. En el año 2016 se evaluó el RSH de tres líneas A en dos densidades de población (96,000 y 48,000 plantas hembra/ha) en la relación 8:2 con el mismo polinizador. Las cuatro líneas androestériles fueron similares en días a floración (entre 111 y 114 d) y porte (promedio de 101 cm). La línea A1 presentó panojas largas (25.7 cm) y el mayor periodo de floración (12.4 d); la línea A2 tuvo mayor RSH/panoja (38.2 g) y la A5 el menor (21.0 g). La línea A9 mostró el menor periodo de la floración (8.7 d), tallos más gruesos (2.03 cm) y menor número de semillas/panoja (888). La alta producción de polen del macho permitió polinizar a las plantas hembra aún en la relación 16:2. Las características agronómicas de las cruzas A × B no isogénicas directas e inversas fueron similares pero su RSH fue mayor que el de las líneas. El rendimiento promedio de semilla híbrida/ha (2.0 t ha^{-1}) de las líneas A puede obtenerse en relaciones de hasta 16:2 con R19 como polinizador.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, híbridos, producción de polen, relaciones de surcos hembra:macho, rendimiento de semilla.

SUMMARY

As a consequence of the recent registration of parental B and R lines of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.)] Moench] adapted to the Highlands of Mexico, it is necessary to develop the corresponding technology for hybrid seed production; that is the objective of this study. In Montecillo, México, in the year 2015, four A-lines and 10 non-isogenic A x B crosses (female parents of single crosses and three-way hybrids, respectively) were characterized morphologically and phenologically. Hybrid seed yield (HSY) was evaluated under 4:2, 8:2, 12:2 and 16:2 female to male row ratios. Line R19 was the common male. The phenological and morphological traits were compared by Student t test; HSY was evaluated in a complete-randomized-blocks design with two replications. Days to flowering and daily and total pollen production were recorded in the male parent. In 2016, the seed yield of three Alines under two plant densities (96,000 and 48,000 female plants/ha) was evaluated in the 8:2 ratio using the same pollinator. The four male-sterile lines were similar in their days to flowering (between 111 and 114 d) and plant height (average of 101 cm). The A1 line has long panicles (25.7 cm) and longest flowering period (12.4 d); the A2 line has the highest seed yield/panicle (38.2 g) while the A5 line has the lowest one (21.0 g). The A9 line showed the shortest flowering period (8.7 d), thicker stems (2.03 cm) and lower number of seeds/panicle (888). The high production of pollen of the male parent allowed to pollinate the female plants even in the 16:2 ratio. The agronomic traits of the A x B non-isogenic direct and inverse crosses were similar, but their seed yield was greater than the line yield. Mean seed yields (2.0 t ha^{-1}) may be obtained in ratios of up to 16:2 with R19 as the pollinator.

Index words: *Sorghum bicolor*, hybrids, pollen production, female to male row ratios, seed yield.

INTRODUCCIÓN

En la producción de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) se utiliza el sistema de androesterilidad génico-citoplásmica, en el que intervienen tres tipos de líneas: A, B y R. Las líneas A y B son isogénicas, excepto que la línea A es androestéril y la línea B es androfértil. La línea R restituye la fertilidad en la F_1 de la cruza A × R (House, 1982; Mendoza-Onofre *et al.*, 2017). En esta especie, los progenitores femeninos de los híbridos simples son las líneas A, mientras que en los híbridos trilineales son las cruzas simples androestériles producto de una línea A × una línea B no isogénica (Galicia-Juárez *et al.*, 2017; Patanothai y Atkins, 1974).

La producción comercial de semilla de los híbridos simples y trilineales de sorgo se efectúa en lotes aislados en los que se alternan surcos del progenitor femenino androestéril (sea línea A o la cruza simple A × B no isogénica, respectivamente) con surcos del progenitor masculino (la línea R). La relación de surcos hembra y macho (RSHM) y consecuentemente, el rendimiento de semilla híbrida depende de varios factores como la capacidad de producción

Recibido: 29 de noviembre de 2017
Aceptado: 5 de noviembre de 2018

de polen de la línea macho, la sincronía y el periodo de las floraciones de ambos progenitores, el porte de las líneas y la dirección y la velocidad del viento (Poehlman y Sleper, 2003; Zanovello, 2008). En un esquema comercial de producción de semilla híbrida es conveniente sembrar la mayor cantidad de surcos hembra, pues éstos son los surcos de interés para maximizar la cantidad de semilla.

La caracterización adecuada de los progenitores de los híbridos permite garantizar la identidad en términos fenotípicos, que se traduce en los conceptos de distinción, uniformidad y estabilidad (UPOV, 2012). Estos caracteres permiten identificar plantas fuera de tipo durante el incremento de semilla de los progenitores y eventualmente de los híbridos. Además, es necesario conocer la RSHM óptima para producir semilla y hacer estimaciones de rentabilidad por unidad de superficie.

En los Valles Altos Centrales de México se han registrado progenitores B y R de híbridos de sorgo tolerantes al frío (Mendoza-Onofre *et al.*, 2017), por lo que es necesario caracterizar a los progenitores femeninos y generar la tecnología de producción de semilla híbrida. Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) caracterizar morfológica y fenológicamente progenitores femeninos de híbridos simples y trilineales de sorgo adaptados a los Valles Altos de México, y 2) cuantificar la producción de polen del progenitor masculino y evaluar el rendimiento de semilla híbrida por unidad de superficie, en función de la relación de surcos hembra:macho.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en lotes aislados durante los años 2015 y 2016 en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México (19º 27' 49'' N y 98º 54' 20'' O, 2243 msnm). El clima de la zona es C(w0)(W)b(i')g, que corresponde a subhúmedo con lluvias en verano, 645 mm de precipitación media anual. El verano es fresco y largo; temperatura del mes frío (enero) entre 3 y 18 ºC y la del mes más cálido (mayo) entre 6.5 y 22 ºC, con una media anual de 16.5 ºC (García, 1988).

Experimentos 2015

Se evaluaron 14 genotipos (progenitores femeninos androestériles), de los cuales cuatro fueron las líneas A1, A2, A5 y A9; los otros 10 correspondieron a la F_1 de cruzas A × B no isogénicas: cinco cruzas A × B directas (Grupo 1): A1 × B2, A1 × B5, A2 × B5, A2 × B9 y A5 × B9; y sus respectivas cinco cruzas A × B inversas (Grupo 2): A2 × B1, A5 × B1, A5 × B2, A9 × B2 y A9 × B5. Cada progenitor se sembró en cuatro RSHM: 4:2, 8:2, 12:2 y 16:2 con dos repeticiones. Se utilizó la línea restauradora R19 como macho común, la cual ha sobresalido en estudios previos (Mendoza-Onofre *et al.*, 2017).

La fecha de siembra fue el 23 de abril de 2015. Las parcelas fueron de 3 m de largo con 0.80 m entre surcos. Las prácticas culturales incluyeron una escarda a los 30 d después de la emergencia y un raleo a 10 cm entre plantas. El número de plantas hembra/ha fueron 80,000; 96,000; 102,000 y 107,000 para las RSHM 4:2, 8:2, 12:2 y 16:2, respectivamente. Se fertilizó con las dosis 120N-80P-00K en la siembra y 80N-00P-00K en el aporque (segundo cultivo). Durante el ciclo del cultivo se aplicaron seis riegos, tres deshierbes manuales y dos aplicaciones de Atrazina (2 L ha^{-1}).

Caracterización de los progenitores

En una repetición de cada progenitor femenino se identificaron 25 plantas representativas en la etapa de hoja bandera. En la floración se registraron las siguientes variables en cada planta: días a floración (DF, días desde la siembra hasta que la mitad de la inflorescencia mostraba estigmas expuestos); periodo de floración (PF, días del inicio al término de la floración); altura de planta (AP, distancia en cm desde el ras del suelo hasta el ápice de la panoja); longitud de panoja (LP, distancia en cm desde la base hasta el ápice de la panoja); ancho de panoja (ANP, distancia máxima en mm entre los extremos laterales de la panoja); diámetro del tallo (DT, en cm en la parte media del tercer entrenudo basal, medido con un vernier digital); y excersión (E × C, distancia en cm desde la inserción de la hoja bandera hasta la base de la panoja). A la cosecha, 15 d después de que las semillas alcanzaron la madurez fisiológica, se cortaron las 25 panojas, se desgranaron individualmente y se pesó el rendimiento de semilla por panoja (RSP, g); el peso de 100 semillas (PCS, g) y se estimó el número de semillas por panoja mediante la ecuación: NSP = (RSP × 100)/PCS.

En el progenitor masculino, al inicio de la floración se identificaron 40 plantas representativas. En 20 plantas se registraron los días a floración (DF, número de días transcurridos desde la siembra hasta que la mitad de la inflorescencia presentaba anteras expuestas); en otras 20 plantas, cada tercer día se embolsaron sus panojas a las 8:00 am, antes de la dehiscencia; a las 3:00 pm cada panoja se sacudió levemente y se retiró la bolsa de modo que en su interior permanecía el polen producido ese día. Las bolsas individuales se secaron a 72 ºC durante 24 h, después se extrajo el polen, mismo que se pesó en una balanza analítica (PD, mg). Este procedimiento se efectuó hasta el final de la floración, realizándose nueve muestreos, todos ellos

de las mismas 20 plantas. La sumatoria de la producción de polen diario dio como resultado la producción total de polen (PT, mg).

Rendimiento de semilla por superficie

En las dos repeticiones se cubrieron cinco panojas con bolsas de papel para evitar daño por pájaros. Las bolsas se colocaron una semana después del final de la floración en cada surco hembra de cada progenitor femenino. A la cosecha (15 d después de que se alcanzó la madurez fisiológica) se cortaron las panojas, se desgranaron en conjunto y se obtuvo el peso total, obteniéndose el rendimiento de semilla híbrida por panoja y por surco (RSPS) en cada relación de surcos hembra:macho. Se estimó el número de semillas por panoja por surco (NSPS) mediante la ecuación: NSPS = (RSPS × 100)/PCS. El RSPS se convirtió a rendimiento de semilla/ha (RSPH) con base en el número de plantas hembra/ha correspondiente a la RSHM de cada caso: 80,000; 96,000; 102,000 y 107,000 para las relaciones 4:2, 8:2, 12:2 y 16:2, respectivamente.

Experimentos 2016

Se sembraron tres líneas androestériles (A1, A2 y A3) en la relación 8:2. Las líneas se ralearon a 10 y 20 cm entre plantas generándose dos densidades de población (96,000 y 48,000 plantas hembra/ha, respectivamente). El polinizador fue la línea R19. La fecha de siembra fue el 5 de mayo de 2016 y el tamaño de parcela y manejo agronómico del cultivo (surcado, riegos, fertilización y control de malezas) fue similar al del año 2015. En cinco plantas representativas se registró el rendimiento de semilla por surco (RSPS) y por hectárea (RSPH), así como el número de semillas por panoja por surco (NSPS) con la misma metodología del año previo. En la línea R19 se registró la producción de polen diario y total por panoja mediante el procedimiento aplicado el año anterior, en una muestra de 10 plantas representativas.

Análisis estadístico

En el año 2015, las variables fenológicas y morfológicas de los 14 genotipos se compararon con base en sus medias (n = 25) y desviaciones estándar mediante pruebas de t de Student ($P \leq 0.05$). La comparación de cruzas directas *vs.* cruzas inversas también se efectuó mediante pruebas de t entre las medias de los dos grupos. Los datos del RSPS y del NSPS de los 14 genotipos en las cuatro RSHM se analizaron con base en un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones. En estas variables la comparación de medias entre genotipos y entre RSHM se efectuó mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Los datos de polen diario y total se graficaron y se corrieron modelos de regresión para caracterizar la dinámica de la producción de polen de la línea restauradora.

En el año 2016, las variables se analizaron con base en un diseño de bloques completos con arreglo factorial; la comparación de medias se efectuó mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los progenitores

Fenología floral

No hubo diferencias ($P \leq 0.05$) en los días a floración entre las líneas A ni entre los dos grupos de cruzas A × B no isogénicas. Los genotipos más precoces florearon a los 111 d (línea A5 y cruzas A2 × B5, A2 × B9, A5 × B1, A5 × B2, A9 × B2) y los más tardíos a los 114 d (líneas A1 y A9) (Cuadro 1). El intervalo de la floración de las cuatro líneas A fue de 3 d ($P \leq 0.05$), entre 111 y 114 d. El promedio de las cinco cruzas directas fue similar ($P \leq 0.05$) al de las cinco cruzas inversas (112 *vs.* 111 d). Los días a floración de las líneas A1, A2, A5 y A9 evaluadas por León-Velasco (2007, Com. Pers.)[1] en Montecillo en el año 1996 en condiciones de riego fueron 10 d más precoces que en la presente investigación, pero esas líneas mantuvieron el mismo intervalo en sus días a floración, lo que indica que reaccionan de manera similar a las diferencias ambientales entre fechas de siembra, pues la localidad fue la misma.

La duración del periodo de floración varió de 8.7 d (línea A9) a 12.5 d (cruza A1 × B5) ($P \geq 0.05$). El periodo de las líneas A1, A2 y A5 fue similar entre ellas (promedio de 12 d) ($P \leq 0.05$). En un estudio que incluyó tres fechas de siembra, en Montecillo, el promedio de los días a floración de la línea A9 fue 101 d y el periodo de la floración fue de 20 d (Cisneros-López *et al.*, 2017), lo que indica que esta línea es sensible a los cambios ambientales, pues en el presente estudio esta línea floreó más tarde (114 d) y su periodo de floración fue más corto (casi 9 d). Yanase *et al.* (2008) sugieren que la iniciación floral se acelera con una temperatura nocturna inferior a 20 ºC, como ocurre en esta localidad. El promedio del periodo de la floración de las cinco cruzas directas fue 11.3 d y el de las cinco cruzas inversas fue 10.6 d ($P \leq 0.05$). En promedio, el periodo de floración de las cruzas fue semejante al de las líneas progenitoras, por lo que se infiere que en este grupo de genotipos no se presenta heterosis para esta variable.

[1]**León-Velasco H. (2007)** Evaluación de dos Generaciones de Híbridos y Progenitores Tolerantes al Frío. Tesis Doctoral. Colegio de Posgraduados. Montecillo, Edo. de México. 101 p.

Cuadro 1. Medias y desviación estándar de variables fenológicas, morfológicas y rendimiento de semilla de 14 genotipos de sorgo. Montecillo, México, 2015.

Gen	DF (d)		PF (d)		AP (cm)		DT (cm)		LP (cm)	
A1	114	± 1.61	12.4	± 1.61	101	± 6.65	1.57	± 0.34	25.7	± 1.59
A1 × B2	112	± 1.35	9.8	± 1.92	104	± 5.29	1.46	± 0.34	22.6	± 2.42
A1 × B5	112	± 1.14	12.5	± 1.16	110	± 7.88	1.43	± 0.24	23.9	± 1.52
A2	112	± 1.08	11.9	± 1.35	93	± 9.59	1.26	± 0.29	18.9	± 2.14
A2 × B1	112	± 1.21	9.2	± 2.92	104	± 12.15	1.68	± 0.31	24.1	± 2.19
A2 × B5	111	±0.96	11.6	± 1.99	107	± 7.66	1.19	± 0.17	20.4	± 1.42
A2 × B9	111	± 0.82	12.2	± 1.18	108	± 9.05	1.96	± 0.29	19.7	± 1.81
A5	111	± 0.79	11.8	± 0.66	97	± 5.58	1.34	± 0.25	18.1	± 2.90
A5 × B1	111	± 1.09	11.1	± 1.22	107	± 7.88	1.84	± 0.24	23.7	± 1.86
A5 × B2	111	± 0.87	11.1	± 1.96	98	± 6.09	1.62	± 0.21	21.9	± 1.38
A5 × B9	112	± 1.32	10.3	± 1.97	109	± 12.55	1.75	± 0.24	18.1	± 2.21
A9	114	± 1.65	8.7	± 1.82	109	± 7.93	2.03	± 0.32	21.1	± 2.75
A9 × B2	111	± 1.19	10.6	± 1.22	108	± 7.51	1.72	± 0.25	19.3	± 1.64
A9 × B5	112	± 1.16	11.1	± 1.39	105	± 8.31	1.97	± 0.29	21.5	± 2.58

Gen	ANP (cm)		ExC (cm)		RSP (g)		NSP	
A1	6.2	± 0.93	11.8	± 4.09	29.2	± 9.54	1418	± 324
A1 × B2	7.7	± 3.04	16.1	± 3.42	38.2	± 13.22	1576	± 448
A1 × B5	6.9	± 1.08	18.5	± 4.12	32.5	± 9.72	1362	± 285
A2	5.4	± 0.86	7.5	± 4.26	27.3	± 8.69	1153	± 302
A2 × B1	8.8	± 1.58	9.9	± 4.69	36.5	± 10.01	1612	± 561
A2 × B5	5.3	± 0.70	12.5	± 4.42	28.4	± 9.79	1214	± 294
A2 × B9	7.2	± 0.74	7.7	± 3.98	25.7	± 8.12	1081	± 320
A5	5.1	± 0.60	13.3	± 3.31	21.0	± 7.15	941	± 228
A5 × B1	10.1	± 1.94	7.7	± 6.04	33.7	± 12.14	1617	± 363
A5 × B2	9.0	± 1.41	9.1	± 3.38	33.1	± 9.65	1435	± 270
A5 × B9	5.6	± 0.66	11.1	± 3.60	27.7	± 6.83	1098	± 392
A9	6.7	± 0.99	9.1	± 3.88	22.5	± 14.48	888	± 631
A9 × B2	6.7	± 0.99	10.8	± 3.85	30.1	± 12.34	1521	± 417
A9 × B5	7.4	± 1.51	9.3	± 5.08	32.1	± 9.97	1490	± 418

Gen: Genotipos; DF: días a floración; PF: periodo de floración; AP: altura de planta; DT: diámetro del tallo; ANP: ancho de panoja; LP: longitud de panoja; ExC: excersión; RSP: rendimiento de semilla por panoja; NSP: número de semillas por panoja. Los valores corresponden a promedios de 25 observaciones.

Desde el punto de vista de producción de semilla, es conveniente que el periodo de receptividad de los estigmas del progenitor femenino sea amplio, lo que sugiere que las líneas A1, A2 y A5 serían mejores progenitores de híbridos simples que la línea A9 y que el sentido de la cruza (directa o inversa) entre líneas A × B no isogénicas no es relevante en la duración de la floración de los progenitores femeninos de los eventuales híbridos trilineales. En maíz (*Zea mays* L.), se ha reportado que el número de semillas correlaciona con el número de estigmas expuestos durante la producción de semilla híbrida (Wang *et al.*, 2017).

Altura de planta y diámetro del tallo

La altura de los genotipos varió de 93 cm (línea A2) a 110 cm (A1 × B5) cm (P ≥ 0.05) (Cuadro 1). La altura promedio de las cuatro líneas A fue de 101 cm. Las líneas A2 y A5 fueron las de menor porte (95 cm en promedio) y la A9 fue 14 cm más alta (Cuadro 1). La altura promedio de las cinco cruzas directas fue 107 cm, similar (P ≤ 0.05) a

la de las cinco cruzas inversas (105 cm), lo que indica que en este grupo de líneas la heterosis para altura de planta es reducida; sin embargo, el porte de todas las cruzas en las que intervinieron las líneas A2 y A5 fue hasta 10 cm mayor que sus progenitores, lo cual no sucedió con las cruzas en las que la línea A9 intervino como progenitor, lo que significa que la magnitud de la heterosis para altura de planta depende de los progenitores involucrados (Jadhav y Deshmukh, 2017); además, este carácter es de alta heredabilidad (94 %) en sorgo (Brown *et al.*, 2006). La altura de planta de las líneas A1, A2, A5 y A9 evaluadas por León-Velasco (2007)[1] en Montecillo en condiciones de riego, varió entre 96 y 105 cm, lo que muestra que el porte de estas líneas es estable, por lo que su bajo porte facilitaría la cosecha y reduciría el riesgo de acame, además de favorecer la polinización, pues la línea R19 es de mayor altura (125 cm).

El diámetro del tallo varió de 1.19 cm (A2 × B5) a 2.03 cm (línea A9) (P ≥ 0.05) (Cuadro 1). Entre las cuatro líneas A, la A9 presentó el tallo más grueso y la A2 (1.26 cm) el más delgado (P ≥ 0.05). Los tallos de las cruzas inversas fueron en promedio 0.21 cm más gruesos que los de las cruzas directas (1.77 *vs.* 1.56 cm) (P ≥ 0.05). Destaca que tanto las cruzas directas como inversas en las que intervino la línea A9 produjeron tallos gruesos, lo que sugiere que hay efectos de dominancia de esta característica, como se ha observado en sorgos dulces (Anami *et al.*, 2015), y que éste es un buen carácter para diferenciar plantas fuera de tipo en esta línea. Mendoza-Onofre *et al.* (2017) reportó valores para las líneas mantenedoras B1, B2 y B5 similares a los del presente estudio, lo que indica que la calidad genética se ha conservado y que este carácter también es poco sensible a los cambios ambientales; por lo tanto, se puede considerar un buen descriptor para distinguir genotipos (UPOV, 2012).

Longitud de panoja, ancho de panoja y excersión

La línea A5 presentó la panoja más corta (18.1 cm) y la línea A1 mostró la más larga (25.7 cm) (P ≥ 0.05) (Cuadro 1). La longitud de panoja de ninguna cruza directa ni inversa excedió a la línea A1. La longitud promedio de las cinco cruzas directas fue de 20.9 cm, similar (P ≤ 0.05) al de las cinco cruzas inversas (22.1 cm). En las cruzas directas e inversas donde intervinieron las líneas A2 y A5 las panojas fueron hasta 5 cm más largas que en los progenitores, lo que no ocurrió en las líneas A1 y A9, lo que confirma que la heterosis para los caracteres agronómicos de importancia antropocéntrica depende de los progenitores involucrados (Mindaye *et al.*, 2016; Williams-Alanís y Arcos-Cavazos, 2015). El promedio de la longitud de panoja de estas cuatro líneas fue similar a lo reportado por León-Velasco (2007)[1], lo que confirma que esta variable es un buen descriptor varietal (UPOV, 2012).

El ancho de la panoja varió de 5.1 cm (línea A5) a 10.1 cm (A5 × B1) (P ≥ 0.05) (Cuadro 1). Entre las cuatro líneas androestériles, la línea A9 presentó la panoja más ancha (6.7 cm). Las panojas de las cruzas inversas fueron en promedio 1.87 cm más gruesas que las cruzas directas (8.39 *vs.* 6.52 cm) (P ≥ 0.05). El ancho de panoja de las cruzas en las que intervinieron las líneas A1 y A2 fue mayor que los progenitores, lo que sugiere que hay heterosis para esta característica.

La excersión promedio varió de 7.5 cm (línea A2) a 18.5 cm (A1 × B5) (Cuadro 1) (P ≥ 0.05). Las líneas A2 y A9 presentaron excersión más corta que A1 y A5. La excersión promedio de las cinco cruzas directas fue de 13.2 cm, mientras que en las cruzas inversas fue de 9.4 cm (P ≥ 0.05). Al emplear las líneas A1 y A2 hubo heterosis tanto en las cruzas inversas como en las directas (2.5 cm más largas con el progenitor A2 y 5.5 cm más largas con A1).

El promedio de la excersión de las panojas de estas cuatro líneas evaluadas por León-Velasco (2007)[1] en Montecillo en condiciones de riego fueron similares a los del presente estudio; sin embargo, en siembras tardías y en condiciones de secano se ha observado que la longitud de la excersión casi duplica a la de riego (datos no presentados), lo que indica que esta variable interactúa con el ambiente y es sensible a los cambios en humedad y temperatura inherentes a fechas de siembra y régimen pluvial. Este es un resultado interesante, porque es un carácter que se emplea como descriptor morfológico en sorgo (UPOV, 2012), el cual, según Brown *et al.* (2006), tiene menor heredabilidad (84 %) que altura de planta (94 %) y longitud de raquis y ramas (93 %).

Rendimiento de semilla y número de semillas por panoja

El rendimiento de semilla por panoja varió de 21.0 g (línea A5) a 38.2 g (A1 × B2) (Cuadro 1) (P ≥ 0.05). Entre las cuatro líneas, la A5 presentó el menor RSP (21.0 g) y la A1 el mayor (29.2 g) (P ≥ 0.05) (Cuadro 1). Aunque las cruzas inversas produjeron en promedio 2.7 g de semilla por panoja menos que las cruzas directas (30.4 *vs.* 33.1), la diferencia no fue significativa (P ≤ 0.05). Es importante mencionar que el RSP de todas las cruzas directas e inversas fue mayor que el de sus progenitores, lo que evidencia la presencia de heterosis, que puede manifestarse mediante semillas más pesadas o en mayor número (Yu y Tuinstra, 2001). El RSP de estas líneas (A1, A2, A5 y A9) evaluadas en Montecillo en condiciones de riego fue: 28.6, 24.3, 23.8 y 37.6 g, respectivamente (León-Velasco, 2007)[1], similares a los de la presente investigación, excepto la

línea A9 que produjo 15.1 g menos (37.6 *vs.* 22.5 g).

El número de semillas por panoja fue diferente entre genotipos (P ≥ 0.05) y osciló entre 888 (línea A9) y 1617 (cruza A5 × B1) semillas (Cuadro 1). Entre las cuatro líneas, la A9 presentó menor NSP que la A1 (1418) (P ≥ 0.05). En promedio, las cruzas inversas presentaron más semillas por panoja que las cruzas directas (1535 *vs.* 1266) (P ≥ 0.05). El NSP de las cruzas en las que intervinieron el par de líneas A5 y A9 fue mayor que el de los progenitores, lo que indica presencia de heterosis para esta característica e implica que esas cruzas pueden ser buenos progenitores (Akata *et al.*, 2017) de híbridos trilineales.

Producción de polen diario y total

La línea R19 produjo polen durante 17 d en el año 2015 y durante 15 d en 2016 (Figura 1). La producción/día de polen fue mayor en 2016 (112 mg) que en 2015 (61 mg). La producción máxima se obtuvo a los 8 y 12 d después del inicio de antesis en 2015 y 2016, respectivamente. En ambos años, la producción del polen total se ajustó a un modelo sigmoidal ($y = -1.1741x^3 + 14.025x^2 + 20.47x - 38.064$; $R^2 = 0.99$; $y = -3.6112x^3 + 51.925x^2 - 121.4x + 74.208$; $R^2 = 0.99$), con un máximo de 427 mg a los 12 d después del inicio de antesis en 2015 y de 558 mg a los 14 d del inicio de antesis en 2016.

La abundante producción de polen de esta línea y su amplio periodo de floración (mayor que el de los 14 progenitores femeninos) explican el alto grado de eficiencia de la polinización (Flores-Naveda *et al.*, 2013) aún en la mayor RSHM (16:2) del presente estudio. En esta misma localidad, la línea B9 produjo entre 169 y 401 mg de polen, según la fecha de siembra (Cisneros-López *et al.*, 2017). La cantidad de polen es el principal factor que influye en el éxito de la polinización en especies anemófilas del género *Sorghum* (Kaur y Soodan, 2017).

Rendimiento de semilla por superficie

La eficiencia de la polinización puede evaluarse a través del rendimiento de semilla híbrida por panoja y por superficie. Entre los factores que influyen en los lotes aislados de producción de semilla destacan la sincronización de la floración de los progenitores, la distancia a la fuente de polen (relación de surcos hembra:macho), la cantidad de polen producido por el progenitor masculino y el potencial de producción del progenitor femenino (Beck, 2002; Espinosa *et al.*, 2003)

En el año 2015, los resultados de los análisis de varianza indicaron que el RSPS dependió de las fuentes de variación Genotipos y de la relación de surcos hembra:macho, mientras que la interacción entre ambos no fue significativa. En promedio de las cuatro RSHM, el rendimiento promedio de semilla por panoja por surco de los genotipos varió de 11.9 g (línea A1) a 36.4 g (A2 × B1) (P ≥ 0.05). Entre las cuatro líneas, A2 fue la de mayor rendimiento (25.8 g), seguida de A5 y A9 con 21.4 g, y finalmente la línea A1 (11.9 g) (Cuadro 2). El RSPS promedio de la mayoría de las cruzas directas e inversas superó al de las líneas A, lo que confirma la existencia de heterosis para este atributo y justifica el producir semilla de híbridos trilineales de sorgo por su mayor rendimiento y presumiblemente menor costo, como sucede con maíz en algunos países (Setimela *et al.*, 2006; Torres *et al.*, 2011); sin embargo, la siembra comercial de híbridos trilineales de sorgo dependerá de la superioridad en el rendimiento de grano y de las características agronómicas de éstos con respecto a las de los híbridos simples, así como de los análisis de costos de producción respectivos, aspectos cuyos estudios están en marcha.

En promedio de los 14 genotipos, el mayor RSPS se produjo con la relación 8:2 con 28.7 g/panoja, que al ajustarlo a 96,000 plantas hembra/ha se genera un rendimiento de semilla equivalente a 2,755 kg ha^{-1} (Cuadro 2). Aunque la distancia a la fuente de polen de los surcos centrales en las RSHM 16:2 y 12:2 fue más lejana que en 4:2 y 8:2, el

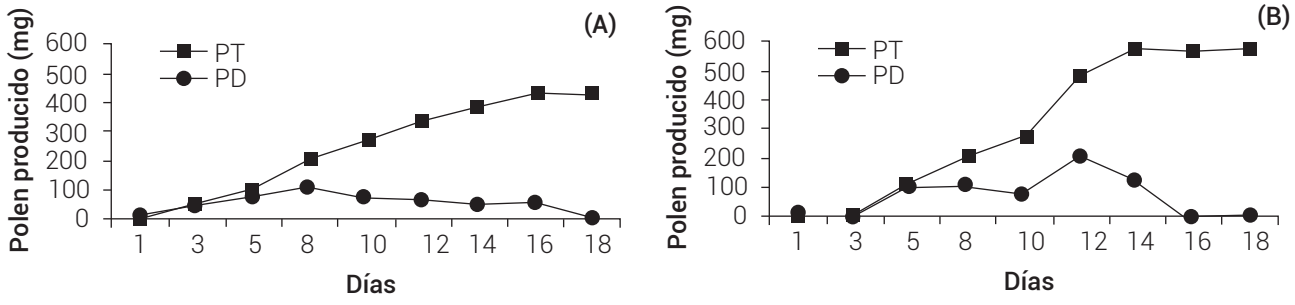


Figura 1. Producción de polen diario (PD) y total (PT) del progenitor masculino R19 en el año 2015 (A) y 2016 (B)

rendimiento promedio de los 16 surcos hembras fue 25.6 g/panoja, que ajustado a una mayor cantidad de plantas hembra/ha equivale a 2739 kg ha^{-1} y el de los 12 surcos hembra a 2570 kg ha^{-1}. Se esperaba que a mayor RSHM el rendimiento de semillas por panoja y por unidad de superficie fuera menor (Hernández-Martínez *et al.*, 2006), lo cual no sucedió en el presente estudio, pues la línea R19 es un polinizador bastante eficiente. Esto indica que estos progenitores femeninos pueden sembrarse en altas relaciones de surcos hembra:macho sin demérito del rendimiento de semilla por hectárea, siempre y cuando se disponga de un polinizador tan eficiente como R19.

En el año 2016, los resultados de los análisis de varianza para el rendimiento y número de semillas por panoja indicaron que las fuentes principales de variación (genotipos y densidades de plantas) fueron significativas ($P \geq 0.05$) pero la interacción genotipos × densidades no fue significativa ($P \leq 0.05$) para variable alguna.

Entre genotipos, en 2016, la línea A1 presentó el mayor RSP (30.8 g) y el mayor NSP (1289). Ambas variables fueron mayores en la menor densidad, donde hubo menor competencia entre plantas (29.6 g y 1142 semillas) que a la densidad más alta (26.7 g y 1051 semillas) (Cuadro 3); sin embargo, al convertir los datos de rendimiento de semilla/panoja a rendimiento por hectárea es evidente la ventaja de sembrar una mayor población de planta hembras por hectárea (2.56 *vs.* 1.42 t ha^{-1} de semilla).

CONCLUSIONES

Las cuatro líneas androestériles son similares en sus días a floración y porte. La línea A1 se distingue por sus panojas largas y mayor duración del periodo de floración; la línea A2 presenta mayor rendimiento de semilla por panoja y la A5 el menor. La línea A9 tiene el menor periodo de la floración, tallos más gruesos y menor número de semillas por panoja. La línea R19 es un excelente progenitor masculino, pues su producción de polen fue suficiente para polinizar a las plantas hembra aún en la relación de surcos hembra:macho de 16:2. Las cruzas A × B no isogénicas directas presentaron similares características agronómicas que las inversas respectivas. El rendimiento de semilla de los progenitores hembra de los híbridos trilineales es mayor que el de los progenitores de cruzas simples (líneas A) pero su empleo en la producción comercial de semilla requiere de los análisis económicos respectivos.

Cuadro 2. Promedio del rendimiento de semilla por panoja y por surco (g) de cada genotipo en cuatro relaciones de surcos hembra:macho (RSHM) en el año 2015.

Genotipo	RSHM				Promedio
	4:2	8:2	12:2	16:2	
A1	7.2	12.8	12.0	15.8	11.9 g
A1 × B2	33.8	35.9	30.1	31.4	32.8 ab
A1 × B5	23.1	36.5	26.8	28.9	28.8 bcde
A2	27.2	27.3	23.1	25.4	25.8 def
A2 × B1	41.4	36.4	33.5	34.3	36.4 a
A2 × B5	29.3	32.1	27.9	25.5	28.7 bcde
A2 × B9	27.1	26.3	23.6	24.1	25.3 def
A5	21.7	22.6	21.8	19.5	21.4 f
A5 × B1	30.7	30.6	26.4	28.9	29.1 bcd
A5 × B2	25.2	25.4	25.1	21.7	24.3 ef
A5 × B9	30.5	27.1	27.1	26.6	27.8 cde
A9	16.6	23.3	21.8	23.9	21.4 f
A9 × B2	29.7	31.2	26.5	24.5	27.9 cde
A9 × B5	34.6	34.1	27.4	27.8	30.9 bc
Promedio	27.0 AB	28.7 A	25.2 B	25.6 B	
	(2.16)	(2.76)	(2.57)	(2.74)	

Valores con letra mayúscula o minúscula distinta dentro de su columna o hilera respectiva indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). Valores entre paréntesis corresponden a t ha^{-1} de semilla, de acuerdo con el número de plantas hembra/ha de cada RSHM: 80,000, 96,000, 102,000 y 107,000 para 4:2, 8:2, 12:2, y 16:2, respectivamente.

Cuadro 3. Rendimiento de semilla por panoja (g) y por hectárea (t ha^{-1}) de tres líneas A y dos densidades de plantas hembra/ha de sorgo en el año 2016.

Línea	Densidad (plantas hembra/ha)		Promedio
	96,000	48,000	
Rendimiento			
A1	30.4 (2.92)	31.2 (1.50)	30.8 a (2.21)
A2	23.0 (2.21)	29.5 (1.42)	26.2 b (1.81)
A3	27.1 (2.60)	28.0 (1.34)	27.6 ab (1.95)
Promedio	26.7 (2.56) B	29.6 (1.42) A	
Número de semillas			
A1	1217	1361	1289 a
A2	944	1062	1003 b
A3	993	1004	999 c
Promedio	1051 B	1142 A	

Valores con letra distinta mayúscula o minúscula en cada variable dentro de su columna o hilera respectiva, indican diferencias significativas (Tukey, $P \leq 0.05$). Valores entre paréntesis corresponden a rendimiento de semilla (t ha^{-1}).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo a CONACyT por la beca otorgada al primer autor para llevar a cabo sus estudios de Maestría en Ciencias.

BIBLIOGRAFÍA

Akata E. A., C. Diatta, J. M. Faye, A. Diop, F. Maina, B. Sine, W. Tchala, I. Ndoye, G. P. Morris and N. Cisse (2017) Combining ability and heterotic pattern in West African sorghum landraces. *African Crop Science Journal* 25:491-508, doi: 10.4314/acsj.v25i4.7

Anami S. E., L. M. Zhang, Y. Xia, Y. M. Zhang, Z. Q. Liu and H. C. Jing (2015) Sweet sorghum ideotypes: genetic improvement of stress tolerance. *Food and Energy Security* 4:3-24, doi: 10.1002/fes3.54

Beck D. L. (2002) Management of Hybrid Maize Seed Production. CIMMYT. El Batán, Texcoco, México. 68 p.

Brown P. J., P. E. Klein, E. Bortiri, C. B. Acharya, W. L. Rooney and S. Kresovich (2006) Inheritance of inflorescence architecture in sorghum. *Theoretical and Applied Genetics* 113:931-942, doi: 10.1007/s00122-006-0352-9

Cisneros-López M. E., A. J. Valencia-Botín and Y. Estrada-Girón (2017) Sorghum (*Sorghum bicolor*) pollen availability and seed set under different proportion male:female plants in Mexican highlands. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO* 49:51-66.

Espinosa A., N. Gómez, M. Sierra, E. Betanzos, F. Caballero, B. Coutiño, A. Palafox, F. Rodríguez, A. García y O. Cano (2003) Tecnología y producción de semillas de híbridos y variedades sobresalientes de maíz de calidad proteínica (QPM) en México. *Agronomía Mesoamericana* 14:223-228.

Flores-Naveda A., C. G. S. Valdés-Lozano, F. Zavala-García, E. Olivares-Sáenz, A. Gutiérrez-Díez y M. E. Vázquez-Badillo (2013) Comportamiento agronómico de líneas para la producción de semilla de sorgo. *Agronomía Mesoamericana* 24:111-118.

Galicia-Juárez M., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, M. E. Cisneros-López, I. Benítez-Riquelme and L. Córdova-Téllez (2017) Heterosis and combining ability of seed physiological quality traits of single cross *vs.* three-way sorghum hybrids. *Acta Scientiarum. Agronomy* 39:175-181; doi: 10.4025/actasciagron.v39i2.31198

García E. (1988) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. 246 p.

Hernández-Martínez M., L. E. Mendoza-Onofre, P. Ramírez-Vallejo and E. Cárdenas-Soriano (2006) Incidence and severity of ergot (*Claviceps africana* Frederickson, Mantle and de Milliano) in two male-sterile sorghum lines as a function of distance from pollen source and its impact on seed production and quality. *Seed Science and Technology* 34:393-402, doi: 10.15258/sst.2006.34.2.15

House L. R. (1982) El Sorgo. Guía para su Mejoramiento Genético. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 61 p.

Jadhav R. R. and D. T. Deshmukh (2017) Heterosis and combining ability studies in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) over the environments. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6:3058-3064, doi: 10.20546/ijcmas.2017.610.360

Kaur R. and A. S. Soodan (2017) Reproductive biology of *Sorghum halepense* (L.) Pers. (Poaceae; Panicoideae; Andropogoneae) in relation to invasibility. *Flora* 229:32-49, doi: 10.1016/j.flora.2017.02.009

Mendoza-Onofre L. E., M. E. Cisneros-López, M. Galicia-Juárez y M. Hernández-Martínez (2017) Líneas mantenedoras (líneas B) y restauradoras (líneas R) de sorgo granífero adaptadas a los Valles Altos Centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40:107-110.

Mindaye T. T., E. S. Mace, I. D. Godwin and D. R. Jordan (2016) Heterosis in locally adapted sorghum genotypes and potential of hybrids for increased productivity in contrasting environments in Ethiopia. *The Crop Journal* 4:479-489, doi: 10.1016/j.cj.2016. 06.020

Patanothai A. and R. E. Atkins (1974) Yield stability of single crosses and three-way hybrids of grain sorghum. *Crop Science* 14:287-290, doi: 10.2135/cropsci1974.0011183x001400020035x

Poehlman J. M. y D. A. Sleper (2003) Mejoramiento Genético de las Cosechas. 2a. ed. Limusa. México, D. F. 506 p.

Setimela P. S. X. Mhike, J. F. McRobert and D. Muungani (2006) Maize hybrids and open-pollinated varieties: seed production strategies. *In*: Strategies for Strengthening and Scaling up Community-Based Seed Production. P. S. Setimela and P. Kosina (eds.). CIMMYT. México, D.F. pp:1-8.

Torres F. J. L., E. J. Morales R., A. González H., A. Laguna C. y H. Córdova O. (2011) Respuesta de híbridos trilineales y probadores de maíz en Valles Altos del Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2:829-844.

UPOV, International Union for the Protection of New Varieties of Plants (2012) Sorghum. TG/122. UPOV Code: SRGHM. *Sorghum* ssp. Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Uniformity and Stability. Geneva, Switzerland. 48 p.

Wang J., L. Tong, S. Kang, F. Li, X. Zhang, R. Ding, T. Du and S. Li (2017) Flowering characteristics and yield of maize inbreds grown for hybrid seed production under deficit irrigation. *Crop Science* 57:2238-2250, doi: 10.2135/cropsci2016.10.0868

Williams-Alanís H. y G. Arcos-Cavazos (2015) Comportamiento agronómico de híbridos y progenitores de sorgo para grano en las Huastecas. *Agronomía Mesoamericana* 26:87-97, doi:10.15517/am.v26i1.16926

Yanase M., I. Tarumoto and S. Kasuga (2008) Effects of day-length and night temperature on the flowering of sorghum varieties with a dominant thermosensitivity gene. *Grassland Science* 54:57-61, doi: 10.1111/j.1744-697x.2008.00106.x

Yu J. and M. R. Tuinstra (2001) Genetic analysis of seedling growth under cold temperature stress in grain sorghum. *Crop Science* 41:1438-1443, doi: 10.2135/cropsci2001.4151438x

Zanovello G. R. E. (2008) Hybrid maize seed production. *Seed News* 5:1-5.