

EVALUACIÓN DE DOS GENERACIONES DE HÍBRIDOS Y PROGENITORES DE SORGO TOLERANTES AL FRÍO. I: VARIABILIDAD GENÉTICA Y ADAPTABILIDAD

EVALUATION OF TWO GENERATIONS OF COLD TOLERANT SORGHUM HYBRIDS AND PARENTAL LINES. I: GENETIC VARIABILITY AND ADAPTABILITY

Humberto León-Velasco¹, Leopoldo E. Mendoza-Onofre^{2*}, Fernando Castillo-González²,
Tarcicio Cervantes-Santana^{†2}, Ángel Martínez-Garza^{†2}

¹Universidad Autónoma de Chiapas. ²Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Montecillo, Estado de México (leopoldo@colpos.mx)

RESUMEN

En 1990 se evaluó la primera generación de híbridos experimentales de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] tolerantes al frío, adaptados a los Valles Altos Centrales de México y en 1995 se formó la segunda generación de híbridos, con líneas nuevas B y R. Con el propósito de evaluar la variabilidad genética y la adaptabilidad de las dos generaciones de híbridos y progenitores para rendimiento de grano y otras características, en 1996 se establecieron cinco experimentos (tres con riego y dos en secano) en ambientes contrastantes, a 2250 m de altitud. Cada experimento incluyó 12 híbridos de 1^a generación, 80 de 2^a, sus progenitores respectivos y cuatro testigos, en un látice cuadrado 11×11 con cuatro repeticiones. La parcela experimental tuvo dos surcos (3 m largo; 0.7 m ancho) con una planta cada 10 cm. Los híbridos de 2^a generación fueron más precoces, de mayor rendimiento y mejores características agronómicas que los de la 1^a y que la variedad VA-110 (el mejor testigo). Las líneas R de 2^a generación fueron más rendidoras y precoces que las de la 1^a; las líneas B de 2^a generación, con rendimientos similares estadísticamente, fueron más precoces que las de la 1^a y que VA-110. El rendimiento promedio de los 10 mejores híbridos de 2^a generación fue 7.97 t ha⁻¹ en los experimentos con riego y 2.49 t ha⁻¹ en los de secano. En la 1^a generación las líneas R fueron estables para rendimiento y los híbridos para precocidad; las líneas R y los híbridos de 2^a generación mostraron rendimiento estable y deseable.

Palabras clave: *Sorghum bicolor* L. Moench, híbridos, progenitores, tolerancia al frío.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de genotipos en varios ambientes es indispensable en los programas genotécnicos, pues su respuesta relativa con frecuencia cambia de un ambiente a otro. Conocer la magnitud de

ABSTRACT

In 1990, the first generation of cold tolerant experimental sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] hybrids adapted to the Mexican High Central Valleys was evaluated, and in 1995, the second generation of hybrids was developed, with new B- and R- lines. With the purpose of evaluating genetic variability and adaptability of the two generations of hybrids and parental lines for grain yield and other traits, five experiments (three irrigated and two under rain fed conditions) were set up in 1996, in contrasting environments at 2250 m of altitude. Each experiment included 12 hybrids from the 1st generation, 80 from the 2nd, their corresponding parental lines and four testers, in an 11X11 square lattice with four repetitions. The experimental plot had two rows (3 m long, 0.7 wide) with one plant each 10 cm. The 2nd generation hybrids had earlier flowering, greater yield and better agronomic characteristics than those from the 1st generation and the cv. VA-110 (the best tester). The 2nd generation R- lines had earlier flowering and higher yields than those from the 1st; the 2nd generation B- lines, with yields that were statistically similar, had earlier flowering than those of the 1st and VA-110. The average yield of the ten top 2nd generation hybrids was 7.97 t ha⁻¹ in the irrigated experiments and 2.49 t ha⁻¹ under rain fed. In the 1st generation, the R- lines were stable for yield and hybrids were for early flowering; the R- lines and the hybrids of the 2nd generation showed a stable and desirable yield.

Keywords: *Sorghum bicolor* L. Moench, hybrids, parental lines, cold tolerance.

INTRODUCTION

Evaluation of genotypes in several environments is essential in crop breeding programs, because their relative response frequently changes among environments. Knowing the magnitude of the genotype×environment interaction allows the selection of genotypes according to the objectives of the plant breeder (Brancourt-Hulmel and Lecomte, 2003; Coutiño-Estrada and Vidal-Martínez, 2003).

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Julio, 2008. Aprobado: Febrero, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 483-496. 2009.

la interacción genotipo×ambiente permite seleccionar los genotipos de acuerdo con los objetivos del fitomejorador (Brancourt-Hulmel y Lecomte, 2003; Coutiño-Estrada y Vidal-Martínez, 2003).

En los Valles Altos Centrales de México, cuya altitud promedio es mayor de 1800 m, los híbridos convencionales de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] no se adaptan. En el Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México (2250 m de altitud), en 1980 se inició la formación de híbridos tolerantes al frío (TF), adaptados a esa región, con 250 líneas TF donadas por ICRISAT-CIMMYT, provenientes de India y África, de las cuales sólo cinco presentaron respuesta B, y se derivaron sus respectivas isogénicas A. La fuente de androesterilidad citoplásmica procedió de líneas con el sistema CMS-A₁ (Milo-Kafir), donadas por la Universidad de Nebraska, EE. UU. En las 245 líneas R se efectuó selección visual durante un ciclo y se seleccionaron 50, ocho de las cuales se cruzaron con las cinco líneas A en 1989, formándose 40 híbridos denominados “primera generación de híbridos de sorgo TF”, evaluados en 1990 con resultados prometedores (Mendoza-Onofre, 1992; Osuna-Ortega *et al.*, 2000).

Para diversificar y aumentar el número de líneas B TF, en 1986, manualmente se hicieron las cruzas posibles entre las cinco líneas B y desde la F₂ se efectuó selección individual (pedigrí), con criterios como nula ramificación, uniformidad de planta, mayor longitud de panoja y excursión, color y tamaño de grano, y semejante o mayor precocidad que sus antecesoras y la variedad VA-110. Las plantas seleccionadas en cada generación se retrocruzaban hacia una planta A de la generación previa. En 1992 se disponía de líneas A y B con mejores características agronómicas que sus antecesoras. Las 50 líneas R se evaluaron en diversos ambientes y se seleccionaron otras líneas R, con los criterios indicados en la derivación de las nuevas líneas B (Mendoza-Onofre, 1992). En 1995 se cruzaron las líneas nuevas A (8) y R (10), obteniéndose 80 híbridos nombrados “segunda generación de híbridos de sorgo TF”; asimismo se aumentó la semilla de 12 híbridos de 1^a generación (cruzas de 3×4 líneas viejas A y R) y la de los progenitores de ambas generaciones.

Los objetivos del presente estudio fueron medir la variabilidad genética y la adaptabilidad de las dos generaciones de híbridos y progenitores para rendimiento de grano y otras características de planta y panoja, con el supuesto de que: 1) Existe variabilidad genética para rendimiento y otras características en ambas generaciones de genotipos; 2) el rendimiento y la precocidad de los genotipos responde en forma diferente al cambiar de ambiente; 3) la 2^a generación

Conventional sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] hybrids are not adapted to the Mexican High Central Valleys, where the average altitude is 1800 m. At the Colegio de Postgraduados, Montecillo, State of México (2250 m), the development of cold tolerant (CT) hybrids adapted to this region was started in 1980, with 250 CT lines that were donated by ICRISAT-CIMMYT from India and Africa, out of which only five gave a B- response, thus their corresponding A- isogenic lines were developed. The source of cytoplasmic male-sterility was lines with the CMS-A₁ system (Milo-Kafir), donated by the University of Nebraska, US. In the 245 R- lines, one cycle of visual selection was carried out and 50 were selected, eight of which were crossed to the five A- lines during 1989. The 40 resulting hybrids were called “first generation CT sorghum hybrids”, which were evaluated in 1990 with promising results (Mendoza-Onofre, 1992; Osuna-Ortega *et al.*, 2000).

In order to diversify and increase the number of cold tolerant B- lines, in 1986, all possible crosses between the five B- lines were manually done. Individual selection (pedigree) was carried out from the F₂ generation. Selection criteria included traits such as no ramification, plant uniformity, long panicle and exertion, grain color and size, and similar or earlier flowering than their original lines and that cv. VA-110. The plants selected in each generation were backcrossed to one A- plant from the previous generation. In 1992, A- and B- lines with better agronomic traits than their ancestors were available. The 50 R- lines were evaluated in several environments and other R- lines were selected, applying the criteria indicated in the derivation of the new B- lines (Mendoza-Onofre, 1992). In 1995, the new lines, A- (8) and R- (10), were crossed, obtaining 80 hybrids that were called “second generation CT sorghum hybrids”. Likewise, the seed of 12 hybrids of the 1st generation (crosses of 3 old A- × 4 R- lines) and also of the parental lines of both generations were increased.

The objectives of this study were to measure the genetic variability and adaptability of the two generations of hybrids and parental lines for grain yield and other plant and panicle traits. It is assumed that: 1) There is genetic variability for yield and other characteristics in both generations; 2) the yield and earliness of the genotypes vary depending upon the environment; 3) the 2nd generation of genotypes outperforms the 1st and the testers in yield, stability and other traits.

MATERIALS AND METHODS

In 1996, five field experiments were sown, three with irrigation and two in rain fed conditions (Table 1).

de genotipos supera a la 1^a y a los testigos en rendimiento, estabilidad y otras características.

MATERIALES Y MÉTODOS

En 1996 se sembraron cinco experimentos uniformes, tres con riego y dos en seco (temporal) (Cuadro 1).

Cada experimento incluyó 12 híbridos y sus progenitores (3 líneas B y 4 líneas R) de 1^a generación; 80 híbridos y sus progenitores (8 líneas B y 10 líneas R) de 2^a generación; y cuatro testigos: VA-110 y L-88 (ambas TF), RB-4000 y Purépecha (híbridos comerciales susceptibles al frío). Las líneas B fueron las isogénicas de las líneas A. Los 121 genotipos se distribuyeron en un diseño láctice cuadrado 11×11 con cuatro repeticiones. La parcela experimental tuvo dos surcos de 3 m de largo y 0.7 m de ancho.

La siembra fue manual, en seco, a chorrillo en el fondo del surco; se dejó una planta cada 10 cm (142 850 plantas ha⁻¹). Los experimentos con riego tuvieron humedad óptima y los de seco dependieron de la precipitación pluvial (Cuadro 1). En riego se aplicó 120 kg N y 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ y en seco 80 kg N y 40 kg P₂O₅ ha⁻¹; todo el P₂O₅ y la mitad de N se aplicó a la siembra y el resto en el aporte.

En 10 plantas representativas y con competencia completa, por parcela, se registraron los días a floración (DF), desde el riego de siembra o primera lluvia hasta la floración a media panoja; término de la floración: altura de planta (AP, en cm, desde el suelo hasta el ápice de la panoja); longitud de panoja (LP, en cm, de la base al ápice); y exersión (EX, en cm, de la lígula de la hoja bandera a la base de la panoja). A la cosecha, en 20 plantas por parcela: rendimiento de grano (RG, en g/planta, al 12 % de humedad); peso de 100 granos (PG, en g, promedio de ocho submuestras de 100 granos elegidos al azar) y número de granos por panoja (NG=100×RG/PG).

El análisis de varianza (ANVA) combinado (por localidades, en riego o seco) para cada variable, se desglosó de manera anidada, con el PROC GLM (SAS 1999-2000), en tres partes: la primera, debida a la variación entre los grupos de genotipos; la segunda, a genotipos dentro de cada grupo; la tercera, a genotipos individuales. La comparación de medias, ajustadas con LSMEANS del SAS, fue mediante Tukey ($p \leq 0.05$). Cuando la interacción

Each experiment included 12 hybrids and their 1st generation parents (3 B- lines and 4 R- lines), 80 hybrids and their 2nd generation parents (8 B- lines and 10 R- lines); and four testers: VA-110 and L-88 (both CT), RB-4000 and Purépecha (commercial hybrids that are cold-sensitive). The A- and B- lines are isogenic pairs. The 121 genotypes were allocated in an 11×11 square lattice design with four repetitions. The experimental plot had two rows, 3 m long and 0.7 m wide.

Sowing was manual, in dry conditions. Seeds were placed at the bottom of the row. A plant was left each 10 cm (142 850 plants ha⁻¹) at thinning. The irrigated experiments had optimal soil moisture, while the rain fed depended upon the amount of rainfall (Table 1). Under irrigation, 120 kg N and 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ were applied, and 80 kg N and 40 kg P₂O₅ ha⁻¹ in the rain fed experiments; all the P₂O₅ and half the N were applied at sowing and the rest at hilling.

In each experimental plot, the following data was recorded in 10 fully competitive and representative plants: days to flower (DF), from the first irrigation or from the first rainfall to flowering at the middle of the panicle; at the end of flowering: plant height (PH, cm, from the ground to the panicle's tip); panicle length (PL, cm, from the base to the apex); and exertion (EX, cm, from the flag leaf ligulae to the base of the panicle). At harvest, in 20 plants per plot, the following traits were measured: grain yield (GY, g/plant at 12 % moisture); 100-seeds weight (GW, g, the average of eight subsamples of 100 grains randomly selected); and grains per panicle (NG=100×GY/GW).

The combined analysis of variance (ANOVA) by location, either under irrigated or rain fed conditions) was applied for each variable. The genotype effects were broken down in a nested model, with PROC GLM (SAS 1999-2000), in three parts: the first, due to the variation between the genotype groups; the second, due to genotypes within each group; the third, to individual genotypes. The means comparison adjusted with the SAS' LSMEANS was carried out by Tukey ($p \leq 0.05$). When the genotype×environment interaction was significant ($p \leq 0.05$) for yield and DF, stability analyses were carried out, applying the same partitions, through the Eberhart and Russell parameters (Mastache and Martínez, 1998). Eberhart and Russell (1966) and Carballo and Márquez (1970) criteria to classify groups and genotypes was applied.

Cuadro 1. Características de los ambientes de evaluación de los cinco experimentos establecidos en Valles Altos Centrales de México. 1996.

Table 1. Environmental characteristics of the five experiments established in the Mexican High Central Valleys, 1996.

Localidad	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altitud (m)	Siembra		Textura (Suelo)	pH	MO (%)	PP (mm)	Helada (Fecha) [†]
				Condición	Fecha					
Sta. Lucía	19° 29'	98° 54'	2250	Riego	09/05	M-A-A	7.0-7.3	1-2	431	15-20/10
Tecámac	19° 43'	98° 56'	2260	Riego	15/05	Arcilla	7.2-7.6	2-3	326	12-19/10
Montecillo	19° 29'	98° 54'	2250	Riego	16/05	Arcilla	8.0-8.3	1-3	426	15-20/10
Montecillo	19° 29'	98° 54'	2250	Secano	10/06	Arcilla	8.0-8.3	1-3	370	15-20/10
Tecámac	19° 43'	98° 56'	2260	Secano	12/06	Arcilla	7.2-7.6	2-3	320	12-19/10

M-A-A, migajón-arcillo-arenosa; pH, potencial hidrógeno; MO, materia orgánica; PP, precipitación pluvial durante el ciclo de cultivo; [†]Intervalo de las tres primeras heladas.

genotipo \times ambiente resultó significativa ($p \leq 0.05$) para rendimiento y DF, se realizaron análisis de estabilidad, aplicándose las mismas particiones, mediante los indicadores de Eberhart y Russell (Mastache y Martínez, 1998); la clasificación de grupos y genotipos se hizo con los criterios propuestos por Eberhart y Russell (1966) y Carballo y Márquez (1970).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Valles Altos de México, disponer de híbridos o variedades de sorgo con mayor precocidad y rendimiento que VA-110 sería ventajoso, pues esa variedad puede completar su ciclo en el periodo sin heladas, las cuales con frecuencia se presentan desde el primer tercio de octubre. En 1996, las heladas ocurrieron a mediados de octubre y en secano afectaron a los testigos L-88, RB-4000 y Purépecha, así como a los híbridos y progenitores TF tardíos. En riego los híbridos comerciales fueron tardíos, por lo que a su floración la disponibilidad de polen fértil en los experimentos era escasa, lo que causó bajo RG. Por ello, aunque se presenta la información de todos los grupos de genotipos, se enfatiza las comparaciones con VA-110, pues fue el mejor testigo.

Diferencias entre grupos de genotipos

Experimentos con riego

Entre híbridos, los ANVA combinados de los tres experimentos sembrados con riego, indican que el RG promedio del grupo H's-2 (48.85 g/planta, equivalente a 6.98 t ha^{-1}) fue superior ($p \leq 0.05$) al de los grupos H's-1 y VA-110 en 34 y 58 % (Cuadro 2). Destaca que el grupo H's-2 fue 4 d más precoz, con granos más pesados y plantas de mayor porte, LP y EX que el grupo H's-1; también fue 3 d más precoz que VA-110. En cada generación, el rendimiento del grupo de híbridos fue superior al de los grupos de sus respectivos progenitores, aunque su precocidad resultó similar ($p > 0.05$) a la de sus progenitores hembra. Haussmann *et al.* (2000) observaron que el rendimiento de los híbridos de sorgo, promedio de ambientes, superó en 54 % al de sus progenitores, mientras que Mendoza (1983) indica que la precocidad del híbrido se asemeja más a la del progenitor hembra, y según Hammer *et al.* (1989) los híbridos responden como su progenitor más precoz, lo que sugiere que la precocidad muestra algún grado de dominancia en esta especie. El mayor rendimiento de H's-2 pareciera deberse al mayor PG; además, este grupo mostró mayor LP y aceptable NG por panoja, los cuales son los principales componentes del rendimiento de grano en sorgo (Maman *et al.*, 2004).

RESULTS AND DISCUSSION

In the Mexican High Valleys, having sorghum hybrids or open pollinated varieties with earlier flowering and higher grain yield than VA-110 would be advantageous, since this cultivar can complete its growing cycle in the free-frost period. Frosts are frequent from the first third of October in this region. In 1996, frosts occurred in the middle of October and in the rain fed experiments, they affected L-88, RB-4000 and Purépecha testers, as well as the late CT hybrids and parents. In the irrigated experiments, the commercial hybrids were late, thus at flowering, fertile pollen was scarce, causing a low GY. Therefore, although the information from all the genotype groups is given, the comparisons with VA-110 are emphasized, because it was the best tester.

Differences among genotype groups

Irrigation experiments

Among hybrids, the combined ANOVA of the three irrigated experiments show that the average GY of the H's-2 group (48.85 g/plant, equivalent to 6.98 t ha^{-1}) was higher ($p \leq 0.05$) than those of the H's-1 and VA-110 groups by 24 and 58 % (Table 2). It stands out that the H's-2 group was 4 d earlier, with heavier grains and plants of larger size, PL and EX than the H's-1 group; it also was 3 d earlier than VA-110. In each generation, the yield of the hybrid group was superior to that of the groups of their corresponding parental lines, although their earliness was similar ($p \leq 0.05$) to that of their female parents. Haussmann *et al.* (2000) observed that the yield of sorghum hybrids, averaged over environments, outperformed by 54 % that of their parents. Mendoza (1983) indicates that the hybrid's earliness is more similar to that of the female parent, and according to Hammer *et al.* (1989), hybrids respond like their earliest-flowering parent. Thus it is suggested that early flowering shows some degree of dominance in this species. The greatest yield of H's-2 seems to be due to the greater GW; also, this group showed greater PL and an acceptable NG per panicle, which are the main grain yield components in sorghum (Maman *et al.*, 2004).

Among restorer lines, the average yield of the R's-2 group was 40.92 g/plant (4.85 t ha^{-1}), 39 % greater ($p \leq 0.05$) than the R's-1 group and 32 % greater than VA-110; in addition, this group was 2 d earlier than the R's-1, with greater GY, size and PL. The yield of R's-2 was so outstanding that it even outperformed

Cuadro 2. Características agronómicas de los grupos de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío evaluados en cinco ambientes de los Valles Altos de México.**Table 2. Agronomic characteristics of the cold tolerant sorghum hybrids and parental lines groups evaluated in five environments in the Mexican High Valleys.**

Grupo	RG (g/planta)	PG (g)	NG	DF	AP (cm)	LP (cm)	EX (cm)
Promedios de tres experimentos de riego							
H's-2	48.85 a	2.57 b	1912 bc	91 e	142 a	25.4 a	12.9 a
H's-1	36.52 c	1.86 de	1994 b	95 cd	104 c	21.9 c	9.3 bc
R's-2	40.92 b	2.45 c	1700 d	96 c	139 a	23.8 b	9.5 bc
R's-1	29.43 de	1.36 f	2195 a	98 b	101 c	18.1 e	9.0 c
B's-2	26.62 f	1.82 de	1497 e	91 e	97 d	20.5 d	10.5 b
B's-1	27.52 ef	1.93 d	1424 e	95 cd	97 d	21.6 c	6.4 d
VA-110	30.96 d	1.79 e	1785 cd	94 d	85 e	20.3 d	2.5 f
Otros	20.80 g	2.70 a	708 f	111 a	114 b	23.8 b	4.9 e
DSH [†]	2.60	0.114	129	1.16	3.15	0.61	1.48
Promedios de dos experimentos de secano							
H's-2	12.26 a	1.37 a	888 a	93 g	137 a	23.6 a	14.7 a
H's-1	8.07 a-c	1.14 a-c	706 ab	97 e	108 c	21.0 c	12.1 b
R's-2	8.51 a-c	1.10 bc	774 ab	99 d	136 a	22.0 b	11.2 b
R's-1	3.69 d	0.80 d	498 b	102 c	103 d	17.8 e	10.4 bc
B's-2	7.55 b-d	1.32 ab	571 ab	95 f	100 d	20.0 d	12.5 b
B's-1	5.53 cd	1.07 c	529 b	104 b	108 c	22.2 b	8.2 d
VA-110	10.33 ab	1.33 a	749 ab	94 fg	102 d	19.6 d	8.3 cd
Otros	-	-	-	109 a	119 b	22.1 b	4.1 e
DSH [†]	4.38	0.23	328	1.48	4.48	0.95	2.19

H's-1, B's-1 y R's-1, híbridos, líneas mantenedoras y restauradoras de 1^a generación; H's-2, B's-2 y R's-2, híbridos, líneas mantenedoras y restauradoras de 2^a generación; VA-110, testigo TF; Otros, L-88, RB-4000 y Purépecha; RG, rendimiento de grano por planta; PG, peso de 100 granos; NG, número de granos por panoja; DF, días a floración; AP, altura de planta; LP, longitud de panoja; EX, excersión; [†]Diferencia significativa honesta. Valores con diferentes letras en cada columna y condición de humedad son diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Entre líneas restauradoras, el rendimiento promedio del grupo R's-2 fue 40.92 g/planta (5.85 t ha^{-1}) superior ($p \leq 0.05$) al del grupo R's-1 en 39 % y al de VA-110 en 32 %; además, fue 2 d más precoz que R's-1, así como de mayor PG, porte y LP. El rendimiento de R's-2 fue tan destacado que incluso superó ($p \leq 0.05$) al del grupo H's-1. Aunque el grupo R's-1 fue el mejor para NG, su rendimiento fue bajo pues su grano es pequeño y su panoja corta. Entre líneas mantenedoras, los grupos B's-2 y B's-1 resultaron iguales en rendimiento, PG, NG por panoja y AP, pero B's-2 fue 4 d más precoz y de mayor EX ($p \leq 0.05$). El mayor rendimiento de R's-2 sobre B's-2 coincide con resultados de Mendoza-Onofre (1992), donde el rendimiento promedio de las líneas R fue 20 % mayor que el de las líneas B.

Los resultados de los experimentos con riego indican que el programa de mejoramiento fue efectivo pues el grupo de líneas B nuevas fue más precoz y de mayor excersión que el de líneas B anteriores; y el grupo de líneas R nuevas, además de ser más precoz y de mayor rendimiento, tuvo mayor porte y panojas más largas que el de líneas R precedentes. En los híbridos de 2^a generación, se confirmó (Mendoza-Onofre, 1992) que las líneas nuevas producirían mejores híbridos; es

($p \leq 0.05$) the H's-1 group. Although the R's-1 group was the best for NG, its yield was low because the grain is small and the panicle short. Among maintainer lines, the B's-2 and B's-1 groups were the same in yield, GW, NG per panicle and PH, but B's-2 was 4 d earlier and of greater EX ($p \leq 0.05$). The greater R's-2 yield over B's-2 coincides with the results that Mendoza-Onofre (1992) presented, where the average yield of the R- lines was 20% greater than those of the B- lines.

The results from the irrigated experiments indicate that the breeding program was effective because flowering of the group of new B- lines was earlier and of greater exertion than the previous B- lines. Furthermore, the group of new R- lines, in addition to being also earlier and with greater yield, had a larger plant height and longer panicles than the preceding R- lines. The performance of the hybrids of 2nd generation confirmed (Mendoza-Onofre, 1992) that the new lines would produce better hybrids; *i.e.*, the genetic recombination and selection applied during the development of the parental lines of the 2nd generation resulted in higher yielding hybrids, with earlier flowering and of better agronomic traits.

decir, la recombinación genética y la selección aplicada para obtener los progenitores de 2^a generación se tradujo en híbridos más rendidores, más precoces y de mejores características agronómicas.

Experimentos en secano

Los ANVA combinados de los dos experimentos en secano muestran drásticas reducciones para rendimiento, peso y número de granos en todos los grupos, comparados con los de riego (Cuadro 2); debido a que las heladas en la etapa de llenado de grano impidieron que los genotipos llegaran a madurez fisiológica, en particular los más tardíos. Staggenborg y Vanderlip (1996) afirman que la ocurrencia de heladas en esa etapa merma el peso, la calidad y el rendimiento de grano en sorgo. Entre ambas generaciones de híbridos, el rendimiento promedio del grupo H's-2 (12.26 g/planta) fue numéricamente superior al de H's-1 en 52 % y VA-110 en 19 %. Para los caracteres que se expresan antes de las heladas (DF, AP, LP, EX) las diferencias entre grupos son semejantes a las observadas en riego. Además, el grupo H's-2 fue 4 d más precoz y de mayor porte, LP y EX que el H's-1, así como de igual precocidad que VA-110 ($p \leq 0.05$). La precocidad del grupo H's-2 fue más cercana a su grupo B's-2, confirmándose lo observado en riego; es decir, la predominancia de los progenitores femeninos para este carácter. Hammer y Vanderlip (1989) también observaron mayor rendimiento en híbridos nuevos que en viejos, al evaluarlos con riego y en secano, aunque en esta última condición el rendimiento fue menor.

Entre líneas restauradoras el grupo R's-2 fue más precoz que el R's-1 y superior ($p \leq 0.05$) en rendimiento, PG, porte y longitud de panoja. Estos resultados coinciden en riego y en secano, excepto que el grupo R's-1 expresó mejor NG en riego, lo que se atribuye al efecto de las heladas tempranas pues fue de los grupos más tardíos en secano (DF=102). Respecto a las líneas mantenedoras, ambos grupos de líneas B fueron iguales en rendimiento y número de granos, pero el grupo B's-2 fue 9 d más precoz que el B's-1 y de mayor peso de grano y excersión ($p \leq 0.05$).

Variabilidad dentro de grupos y entre genotipos

Experimentos con riego

Las diferencias entre genotipos individuales y dentro de cada grupo (tipo de líneas, híbridos o testigos) fueron significativas para todas las variables. Para simplificar los resultados, en el Cuadro 3 se presentan los genotipos de mayor rendimiento dentro de cada grupo, con base en el promedio de los tres ambientes

Rain fed experiments

The combined ANOVA of the two rain fed experiments show drastic reductions for yield, weight and number of grains in all the groups, as compared to those under irrigation (Table 2). This was because the frosts during the grain filling period did not allow the genotypes to reach physiological maturity, in particular the late flowering ones. Staggenborg and Vanderlip (1996) state that the occurrence of frosts in this stage reduces seed weight, grain quality and yield in sorghum. Between both generations of hybrids, the H's-2 group's average yield (12.26 g/plant) was numerically superior to H's-1 by 52 % and V-110 by 19 %. For the traits already expressed before the frosts (DF, PH, PL, and EX), the differences between groups are similar to those observed in the irrigated experiments. In addition, the H's-2 group was 4 d earlier and of larger size, PL and EX than H's-1, and as early as VA-110 ($p \leq 0.05$). The early flowering of the H's-2 group was closer to its B's-2 group, confirming what was observed under irrigation; that is, the predominance of the female parents for this character. Hammer and Vanderlip (1989) also observed a greater yield in new hybrids than in old, when evaluating them under irrigation and rain fed, although in the latter condition, yield was lower.

Between restorers lines, the R's-2 group were earlier than R's-1 with higher ($p \leq 0.05$) grain yielding, GW, plant height and panicle length. These results coincide in irrigation and rain fed conditions, except in that the R's-1 group expressed better NG in irrigation, which is attributed to the effect of early frosts because it was one of the late flowering groups in rain fed conditions (DF=102). Regarding the maintainer lines, both groups of B- lines were equal in yield and number of grains, but the B's-2 group was 9 d earlier than B's-1 and of greater grain weight and exertion ($p \leq 0.05$).

Variability within groups and between genotypes

Irrigated experiments

The differences between individual genotypes and within each group (line's type, hybrids or testers) were significant for all variables. In order to simplify the results, Table 3 shows the corresponding averages of the top yielder genotypes in each group, based on the average of the three irrigated experiments. The average yield of the top ten H's-2 was 55.79 g/plant (7.97 t ha^{-1}), 31 % higher than the two top H's-1 and 80 % higher than VA-110. The 2nd generation 9×19 hybrid yielded 58.47 g/plant (8.35 t ha^{-1}), 2.27 t ha^{-1} higher than the 1st generation 28×33 and 3.93

Cuadro 3. Características agronómicas de los genotipos de sorgo tolerantes al frío de mayor rendimiento de grano en cada grupo. Promedio de tres localidades de los Valles Altos de México, en riego.**Table 3. Agronomic characteristics of the top cold tolerant sorghum genotypes for grain yield in each group. Averages of three locations in the Mexican High Valleys, under irrigation.**

Genotipo/ Grupo	RG (g/planta)	PG (g)	NG	DF	AP (cm)	LP (cm)	EX (cm)
Híbridos de 2 ^a generación (H's-2)							
9×19	58.47 a [†] a ^p	2.40 d df	2455 a a	93 ab eh	138 cd df	23.5 ef eg	10.3 de dh
9×22	58.24 a a	2.44 cd df	2401 ac ab	92 ac fi	150 ab bc	22.5 fg gi	10.5 ce cg
1×19	58.11 a a	2.42 cd df	2414 ab ab	90 bd hj	145 bc ce	31.0 a a	15.2 ab ab
9×17	56.96 a a	2.70 bd cd	2080 be ae	92 ac fi	136 de ef	20.8 g ij	11.2 be bf
11×17	56.85 a a	3.08 a a	1865 e df	91 bd gj	129 e fg	24.9 de df	7.6 e fi
1×22	54.45 a ab	2.40 d df	2296 ad ac	90 bd hj	158 a ab	30.2 a a	15.8 a a
7×16	53.99 a ab	2.65 bd cd	2036 ce be	89 cd ij	158 a ab	27.9 b b	12.2 ad ae
7×17	53.89 a ab	2.93 ab ac	1849 e df	88 d j	142 bd ce	25.7 cd cd	14.9 ab ac
9×23	53.58 a ab	2.47 cd df	2186 ae ad	95 a cf	147 b cd	23.4 ef eg	11.5 be af
1×17	53.36 a ab	2.73 bc bd	1967 de ce	90 bd hj	142 bd ce	27.4 bc bc	14.7 ac ad
Media [†]	55.79	2.62	2155	91	145	25.7	12.4
DSH [‡]	7.43	0.32	370	3.3	9.0	1.74	4.22
Híbridos de 1 ^a generación (H's-1)							
28×33	42.56 a cd	1.96 a gh	2175 a ad	97 a bd	106 a hi	21.3 a hj	5.7 a ik
28×34	42.33 a cd	2.05 a gh	2127 a ae	96 a be	101 a i	20.7 a ij	6.5 a gj
Media [†]	42.44	2.00	2151	97	104	21.0	6.1
DSH [‡]	5.81	0.25	289	2.6	7.0	1.36	3.30
Líneas R de 2 ^a generación (R's-2)							
22	53.30 a ab	2.59 a ce	2059 a be	96 a be	163 a a	25.2 a de	9.3 a ei
20	48.74 a bc	2.29 b eg	2138 a ae	98 a bc	144 b ce	22.8 b gh	7.4 a fi
Media [†]	51.02	2.44	2098	97	153	24.0	8.3
DSH [‡]	5.66	0.25	282	2.5	6.8	1.32	3.22
Línea R de 1 ^a generación (R-1)							
34	32.20 e	1.36 j	2385 ab	99 b	104 hi	17.4 k	9.4 ei
Línea B de 2 ^a generación (B-2)							
9	31.13 ef	1.46 j	2179 ad	95 cf	102 i	18.3 k	5.9 hj
Línea B de 1 ^a generación (B-1)							
28	34.82 de	2.28 eg	1504 fg	98 bc	106 hi	20.3 j	1.4 k
Testigo TF							
VA-110	30.96 ef	1.79 hi	1785 ef	94 dg	85 j	20.3 j	2.5 jk
Otros							
L-88	35.54 a de	3.04 a ab	1149 a gh	93 c eh	124 a g	22.3 c gi	8.4 a ei
Purépecha	23.91 b f	2.84 b ac	872 b h	118 b a	112 b h	23.3 b fg	5.0 b ik
RB-4000	2.94 c g	2.21 c fg	103 c i	121 a a	105 c hi	25.8 a cd	1.4 c k
Media [†]	20.80	2.70	708	111	114	23.8	4.9
DSH [‡]	3.63	0.16	181	1.6	4.4	0.85	2.06
Media [§]	43.21	2.38	1838	93	131	24.1	11.4
DSH ^p	7.79	0.343	387	3.47	9.4	1.82	4.42

RG, rendimiento de grano por planta; PG, peso de 100 granos; NG, número de granos por panoja; DF, días a floración; AP, altura de planta; LP, longitud de panoja; EX, excursión. [†]Media de los genotipos incluidos en el cuadro; [§]Media general; [‡]La primera columna de letras indica la diferencia significativa honesta dentro de cada grupo; ^pLa segunda columna de letras marca la diferencia significativa honesta general. Valores con diferente letra en cada columna y grupo de genotipos son diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

de riego. El rendimiento promedio de los 10 mejores H's-2 fue 55.79 g/planta (7.97 t ha^{-1}), superior en 31 % al de los dos mejores H's-1 y en 80 % al de VA-110. El híbrido 9×19 de 2^a generación produjo

t ha^{-1} more than VA-110. These ten H's-2 were as early or earlier, than VA-110. The two H's-1 (28×33 and 28×34) were not different ($p \leq 0.05$) for all the variables and equal to VA-110 in earliness; however,

58.47 g/planta (8.35 t ha⁻¹), superior en 2.27 t ha⁻¹ al 28×33 de 1^a generación y en 3.93 t ha⁻¹ a VA-110. Estos 10 H's-2 fueron tan o más precoces que VA-110. Los dos H's-1 (28×33 y 28×34) fueron no diferentes ($p > 0.05$) en todas las variables e iguales a VA-110 en precocidad; sin embargo, por su menor rendimiento y pobres características agronómicas no compiten con los 10 H's-2 superiores.

En las líneas restauradoras, el rendimiento promedio de las dos mejores R's-2 (7.29 t ha⁻¹) fue 58 y 65 % mayor que el de la mejor R-1 (Línea 34) y el de VA-110, y la Línea 22 (la mejor R-2, 7.61 t ha⁻¹) rindió 3.19 t ha⁻¹ más que VA-110. La Línea 22 destaca pues su precocidad se asemeja a la de VA-110, pero su rendimiento fue 72 % mayor al de esa variedad y similar al de los 10 mejores híbridos de 2^a generación, por lo que tiene potencial como variedad de polinización libre en áreas de riego en los Valles Altos. Entre las líneas mantenedoras, la B-2 más rendidora (Línea 9) produjo lo mismo ($p > 0.05$) que la mejor B-1 (Línea 28) pero en promedio fue 3 d más precoz (Cuadro 3).

En general, los genotipos con mayor número de granos, panojas más largas y granos más pesados fueron más rendidores, como en los 10 H's-2 y las 2 R's-2. Resalta que esos 10 híbridos nuevos presentaron la mejor excersión y en promedio fueron más precoces que sus mejores progenitores. Cisneros-López *et al.* (2007) indican que 15 híbridos nuevos de sorgo TF expresaron mayor rendimiento que el promedio de sus progenitores. Además, los resultados confirman que PG, NG por panoja y LP son los principales componentes del rendimiento de grano (Maman *et al.*, 2004; Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006).

Experimentos en secano

También en este caso las diferencias entre genotipos individuales y dentro de cada grupo fueron significativas para todas las variables. En los genotipos de mayor rendimiento dentro de cada grupo, promedio de los dos ambientes de secano (Cuadro 4), destaca la disminución en rendimiento, peso y número de granos, comparados con los de riego, debido principalmente a las heladas, ya comentadas.

El rendimiento promedio de los 10 mejores H's-2 fue 17.4 g/planta (2.49 t ha⁻¹), superior en 64 % al de los dos mejores H's-1 y en 68 % al de VA-110; además, fueron superiores en la mayoría de variables, pero con precocidad similar al mejor progenitor B-2 (Línea 6). El híbrido 6×20 de 2^a generación produjo 2.73 t ha⁻¹, superior en 1.13 t ha⁻¹ al híbrido 29×31 de 1^a generación y en 1.25 t ha⁻¹ a VA-110. Los 10 H's-2 fueron semejantes ($p > 0.05$) en rendimiento,

because of their lower yield and poor agronomic traits, they do not compete with the ten top H's-2.

Regarding the restorer lines, the average yield of the two best R's-2 (7.29 t ha⁻¹) were 58 and 65 % higher than those of the best R-1 (Line 34) and VA-110; Line 22 (the best R-2, 7.61 t ha⁻¹) yielded 3.19 t ha⁻¹ more than VA-110. Line 22 stands out because its earliness is similar to that of VA-110, but its yield was 72 % higher than that cultivar and similar to the 10 best 2nd generation hybrids. Thus, this line has potential as an open pollinated cultivar in irrigated areas of the Mexican High Valleys. Among the maintainer lines, the highest yielding B-2 (Line 9) yielded the same ($p \leq 0.05$) as the best B-1 (Line 28), but on average it was 3 d earlier (Table 3).

In general, the genotypes with higher number of grains, longer panicles and heavier grains had higher yields, such as the ten H's-2 and the two R's-2. Something that stands out is that these 10 new hybrids had the best exertion and averaged earlier flowering than their parents. Cisneros-López *et al.* (2007) indicate that 15 new CT sorghum hybrids showed a higher yield than the average of their parents. In addition, the results confirm that GW, NG per panicle and PL are the main grain yield components (Maman *et al.*, 2004; Valadez-Gutiérrez *et al.*, 2006).

Rain fed experiments

The differences between individual genotypes and within each group were also significant for all the variables. In the corresponding average of the two rain fed experiments (Table 4), the decrease in yield, weight and number of grains stands out, when compared to those under irrigation, due mainly to the frosts, already mentioned.

The average yield of the ten top H's-2 was 17.4 g/plant (2.49 t ha⁻¹), 64 % greater than the two best H's-1 and 68 % higher than VA-110; in addition, they were superior in most of the variables, but with similar earliness than the best B-2 parental line (Line 6). The 2nd generation 6×20 hybrid produced 2.37 t ha⁻¹, 1.13 t ha⁻¹ higher than the 1st generation 29×31 hybrid and 1.25 t ha⁻¹ higher than VA-110. The top 10 H's-2 were similar ($p \leq 0.05$) in yield, number of grains and exertion; nine of them turned out to be equal to VA-110 in earliness and only the 7×17 was 5 d earlier, as they were under irrigation. The behavior of the 1×22 coincides in both moisture conditions, where it was one of the best for grain number, plant size, exertion length and earliness. The 7×17, 9×19 and 1×22 hybrids are among the top 10 both under irrigation and in rain fed; in the case of the 7×17 this might be because of its early flowering (88 and 89 d).

Cuadro 4. Características agronómicas de los genotipos de sorgo tolerantes al frío de mayor rendimiento de grano en cada grupo. Promedio de dos localidades de los Valles Altos de México, en secano.**Table 4. Agronomic characteristics of the top cold tolerant sorghum genotypes for grain yield in each group. Averages of two locations in the Mexican High Valleys, under rain fed.**

Genotipo/ Grupo	RG (g/planta)	PG (g)	NG	DF	AP (cm)	LP (cm)	EX (cm)							
Híbridos de 2ª generación (H's-2)														
6×20	19.11 a [†] a ^p	1.60 ab	ab	1215 a	ac	92 bd	gi	138 bc	cd	23.0 de	ce	15.4 a	ad	
6×22	18.49 a	a	1.47 ac	ac	1246 a	ab	91 cd	hi	147 ab	ac	23.9 c-e	bd	16.2 a	ad
7×17	17.90 a	a	1.68 a	a	1055 a	ae	89 d	i	142 ac	bd	24.8 cd	bc	16.4 a	ac
2×20	17.83 a	a	1.38 bc	ae	1339 a	a	96 a	df	134 c	de	22.2 e	de	13.0 a	bf
5×16	17.62 a	a	1.59 ab	ab	1078 a	ae	91 cd	hi	142 ac	bd	24.2 ce	bd	15.1 a	ae
1×16	17.14 a	ab	1.51 ac	ac	1135 a	ae	93 ac	fh	148 a	ac	27.7 a	a	16.8 a	ab
3×22	16.87 a	ab	1.61 ab	ab	1022 a	ae	91 cd	hi	145 ab	ac	25.3 bc	b	15.0 a	ae
5×22	16.42 a	ac	1.44 ac	ad	1119 a	ae	92 bd	gi	143 ac	ad	24.6 cd	bc	14.8 a	ae
9×19	16.39 a	ac	1.38 bc	ae	1217 a	ac	95 ab	dg	134 c	de	22.1 e	de	13.4 a	bf
1×22	16.27 a	ad	1.32 c	be	1210 a	ad	95 ab	dg	151 a	ab	27.8 a	a	14.5 a	ae
Media [†]	17.40		1.50		1164		93		142		24.6		15.1	
DSH [†]	5.21		0.27		390		3.3		10		2.12		4.90	
Híbridos de 1ª generación (H's-1)														
29×31	11.20 a	be	1.13 a	de	1000 a	ae	97 a	de	116 a	fg	22.9 a	ce	18.7 a	a
30×34	10.01 a	df	1.31 a	be	742 a	df	94 b	eh	103 b	h	19.5 b	f	9.9 b	eg
Media [†]	10.60		1.22		871		96		110		21.2		14.3	
DSH [†]	5.19		0.27		388		2.6		7.7		1.63		3.78	
Líneas R de 2ª generación (R's-2)														
22	10.87 a	be	1.26 a	ce	859 a	bf	97 a	de	149 a	ab	23.1 a	be	12.0 a	bf
16	10.19 a	cf	1.14 a	de	937 a	af	98 a	cd	153 a	a	23.1 a	be	11.1 a	df
Media [†]	10.53		1.20		898		97		151		23.1		11.5	
DSH [†]	4.84		0.25		362		2.6		7.8		1.66		3.83	
Línea R de 1ª generación (R-1)														
31	4.03	f	0.72	f	677	ef	102	b	106	gh	16.9	g	11.2	cf
Línea B de 2ª generación (B-2)														
6	9.13	ef	1.36	ae	682	ef	95	dg	104	h	19.5	f	16.4	ac
Línea B de 1ª generación (B-1)														
29	5.53	ef	1.08	e	529	f	101	bc	105	h	24.6	bc	12.5	bf
Testigo TF														
VA-110	10.33	ce	1.33	be	749	cf	94	eh	102	h	19.6	f	8.3	fg
Otros														
L-88	-	-	-	-	-	-	103 b	b	125 a	ef	21.4 b	ef	5.2 a	gh
Purépecha	-	-	-	-	-	-	116 a	a	112 b	gh	22.9 a	ce	3.0 a	h
Media [†]	-	-	-	-	-	-	110		119		22.2		4.1	
DSH [†]	-	-	-	-	-	-	2.0		6.0		1.26		2.92	
Media [§]	10.87		1.30		821		95		129		22.7		13.6	
DSH ^p	6.28		0.33		470		3.54		11		2.26		5.22	

RG, rendimiento de grano por planta; PG, peso de 100 granos; NG, número de granos por panoja; DF, días a floración; AP, altura de planta; LP, longitud de panoja; EX, excersión. [†]Media de los genotipos incluidos en el cuadro; [§]Media general; [†]La primera columna de letras indica la diferencia significativa honesta dentro de cada grupo; ^pLa segunda columna de letras marca la diferencia significativa honesta general. Valores con diferente letra en cada columna y grupo de genotipos son diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

número de granos y excersión; nueve de ellos resultaron iguales a VA-110 en precocidad y sólo el 7×17 fue 5 d más precoz, así como lo fue en riego. El comportamiento del 1×22 coincide en ambas condiciones de humedad, donde fue de los mejores para número de

These three hybrids could be sown in the two moisture conditions. In terms of the H's-1, although the early flowering of the two best ones was similar to that of VA-110, their grain yield does not compete with most of the top 10 H's-2 under rain fed conditions.

granos, porte de planta, longitud de excersión y precocidad. Los híbridos 7×17, 9×19 y 1×22 están entre los 10 mejores tanto en riego como en seco; en el caso del 7×17 quizás por su precocidad (88 y 89 d), por lo que esos tres híbridos podrían sembrarse en las dos condiciones de humedad. En relación a los H's-1, si bien la precocidad de los dos mejores fue similar a la de VA-110, su rendimiento de grano no compite con el de la mayoría de los 10 H's-2 superiores en seco.

En cuanto a las líneas restauradoras, el rendimiento promedio de las dos mejores R's-2 fue 161 % mayor que el de la mejor R-1 (Línea 31). Nuevamente la Línea 22 (R-2, 10.87 g/planta) destacó por su rendimiento y precocidad, entre otras características, por lo que también podría recomendarse como variedad de polinización libre en seco. Como ocurrió en riego, el rendimiento y otros caracteres de los H's-2 fueron más similares a sus progenitores R's-2. Respecto a las mejores líneas mantenedoras, las Líneas 29 (B-1) y 6 (B-2) fueron iguales ($p > 0.05$) para la mayoría de variables, excepto que la Línea 6 fue 6 d más precoz y de menor longitud de panoja que su antecesora 29. La similitud entre dichas líneas se atribuye a que las líneas B nuevas son producto del entrecruzamiento de algunas líneas viejas. Aún así, es evidente que durante la selección hubo mejoría al menos en precocidad; carácter que según Hausmann *et al.* (2000) fue más importante que el potencial de rendimiento, para adaptar el sorgo a ambientes con sequía final extrema.

Con base en la información global de los cinco experimentos, el mayor rendimiento y las mejores características de los híbridos TF de 2^a generación se atribuye a la selección más rigurosa impuesta a sus progenitores y al alto potencial de producción de grano de los machos (R's-2) que les permitiría incluso usarlos como variedades de polinización libre; especialmente la Línea 22, misma que en riego había producido 8.5 t ha⁻¹ de grano (León *et al.*, 1998). Se corrobora que los criterios aplicados en la selección fueron efectivos para formar líneas B y R de mejores características agronómicas y precocidad semejante o mayor que sus antecesoras y que VA-110.

Interacción genotipo×ambiente en condiciones de riego

Comportamiento entre grupos de genotipos

Según las seis categorías sugeridas por Eberhart y Russell (1966) y Carballo y Márquez (1970), en promedio, el rendimiento de los grupos H's-2, R's-2 y R's-1 fue estable ($b_i = 1$, $S^2d_i = 0$); los grupos H's-1

When the restorer lines are compared, the average yield of the two best R's-2 was 161 % greater than the best R-1 (Line 31). Again, Line 22 (R-2, 10.87 g/plant) stood out because of its yield and early flowering, among other traits, which is why it could also be recommended as an open pollinated cultivar under rain fed conditions. As it happened in the irrigated experiments, the yield and other traits of the H's-2 were more similar to their R's-2 parents. In terms of the best maintainer lines, the Lines 29 (B-1) and 6 (B-2) were equal ($p \leq 0.05$) for most of the variables, except that Line 6 was 6 d earlier with shorter panicle length than its parent, 29. The similarity between these lines is attributed to the fact that the new B- lines are a product of the cross among some old lines. Even so, it is evident that during selection there was an improvement at least in earliness. According to Hausmann *et al.* (2000), this trait is more important than the yield potential, when the purpose is to adapt sorghum to environments with extreme final drought.

Based on the global information of the five experiments, the highest yield and the best agronomic traits of 2nd generation CT hybrids are attributed to the more rigorous selection imposed on their parental lines and the high grain yield potential of the male-parents (R's-2). In turn, this high yield of the R's-2 lines would allow them to even be used as open pollinated cultivars; especially for Line 22, which under irrigation yielded 8.5 t ha⁻¹ (León *et al.*, 1998). It is corroborated that the criteria applied during the selection process were effective for creating B- and R- lines of better agronomic characteristics and similar earliness or even earlier, than their parental lines and VA-110.

Interaction genotype×environment under irrigation

Behavior among groups of genotypes

According to the six categories suggested by Eberhart and Russell (1966), and Carballo and Márquez (1970), on average, the yield of the H's-2, R's-2 and R's-1 groups was stable ($b_i = 1$, $S^2d_i = 0$). The H's-1 and B's-2 groups showed a better response under unfavorable environments ($b_i < 1$) and were consistent ($S^2d_i = 0$). Instead, the B's-1 group presented a better response in better environments ($b_i > 1$), also with consistency; the yield of VA-110 varied depending on the change of environment ($b_i = 1$), but was inconsistent ($S^2d_i > 0$) (Table 5). Having stable hybrids allows greater probability to obtain relatively consistent yields throughout environments with less

y B's-2 mostraron mejor respuesta en ambientes desfavorables ($b_i < 1$) y fueron consistentes ($S^2d_i = 0$); en cambio, el grupo B's-1 presentó mejor respuesta en mejores ambientes ($b_i > 1$), también con consistencia; el rendimiento de VA-110 varió de acuerdo al cambio del ambiente ($b_i = 1$) pero fue inconsistente ($S^2d_i > 0$) (Cuadro 5). Disponer de híbridos estables proporciona mayor seguridad para obtener rendimientos relativamente consistentes a través de ambientes y disminuir los problemas de producción de semilla al cubrir grandes áreas con la siembra de pocos híbridos (Torres y Williams, 1988).

Respecto a la precocidad, el grupo H's-1 fue el único estable y consistente. Los grupos H's-2, R's-1 y B's-2 tuvieron mejor respuesta en ambientes "favorables" con consistencia; mientras los grupos B's-1 y VA-110 tuvieron respuesta proporcional al ambiente pero con inconsistencia. El grupo R's-2 fue consistente y de mejor respuesta en ambientes desfavorables.

En consecuencia, el ambiente tuvo gran influencia en la expresión diferencial de los grupos de genotipos para rendimiento y precocidad. Sin embargo, resalta el alto rendimiento y la estabilidad de H's-2; características que debe reunir un "genotipo deseable", de acuerdo con Eberhart y Russell (1966) y Carballo y Márquez (1970). Por tanto, el único grupo deseable en rendimiento de grano y estabilidad fue el de los híbridos de 2ª generación. El concepto "variedad deseable" se aplicó para el caso de la producción de maíz (*Zea mays* L.) de EE. UU., donde existe gran amplitud en producción y productividad (Peterson *et al.*, 1997). Asimismo, Rodríguez-Pérez *et al.* (2005) identificaron dos patrones

seed production problems since large areas may be sown with few hybrids (Torres and Williams, 1988).

Regarding earliness, the H's-1 group was the only stable and consistent one. The H's-2, R's-1 and B's-2 groups had a better response in "favorable" environments with consistency, while the B's-1 and VA-110 groups had a response proportional to the environment but with inconsistency. The R's-2 group was consistent and had a better response in unfavorable environments.

As consequence, the environment had a great influence over the differential expression of the genotype groups for yield and earliness. However, the high yield and stability of H's-2 stands out; these characteristics should be included in a "desirable genotype", according to Eberhart and Russell (1966), and Carballo and Márquez (1970). Therefore, the only desirable group for grain yield and stability was that of the 2nd generation hybrids. The concept of "desirable variety" was applied for the case of corn (*Zea mays* L.) production in the US, where there is a great range of production and productivity (Peterson *et al.*, 1977). Likewise, Rodríguez-Pérez *et al.* (2005) identified two desirable adaptation patterns in a commercial wheat variety (*Triticum aestivum* L.): one associated with high yield and minimal effects of the genotype \times environment interaction, and another with good response in favorable environments due to positive effects of the interaction.

Behavior within groups and among genotypes

In the stability analyses of the top genotypes in each group, in the three irrigated experiments, an average

Cuadro 5. Parámetros de estabilidad para rendimiento de grano y días a floración de los grupos de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. Promedios de tres localidades de Valles Altos de México, con riego.

Table 5. Stability parameters for grain yield and days to flower of cold tolerant sorghum hybrids and parental lines groups. Averages of three locations in the Mexican High Valleys, under irrigation.

Grupo	Rendimiento (g/planta)	b_i	S^2d_i	Floración (d)	b_i	S^2d_i
H's-2	48.85 a	1.34 = 1	-0.13 = 0	91 e	1.16 > 1	-0.21 = 0
H's-1	36.52 c	-0.82 < 1	0.37 = 0	95 cd	0.88 = 1	0.25 = 0
R's-2	40.92 b	1.51 = 1	1.37 = 0	96 c	0.96 < 1	-0.22 = 0
R's-1	29.43 de	0.02 = 1	0.97 = 0	98 b	1.01 > 1	-0.22 = 0
B's-2	26.62 f	0.19 < 1	-0.63 = 0	91 e	1.18 > 1	-0.02 = 0
B's-1	27.52 ef	1.60 > 1	-1.10 = 0	95 cd	1.30 = 1	2.31 > 0
VA-110	30.96 d	0.32 = 1	17.23 > 0	94 d	0.92 = 1	5.31 > 0
Otros	20.80 g	3.83 = 1	5.82 > 0	111 a	0.59 = 1	3.30 > 0
DSH [†]	2.60			1.16		

H's-1, B's-1 y R's-1, híbridos, líneas mantenedoras y restauradoras de 1ª generación; H's-2, B's-2 y R's-2 híbridos, líneas mantenedoras y restauradoras de 2ª generación; VA-110, testigo TF; Otros, L-88, RB-4000 y Purépecha; $b_i = 1$, $S^2d_i = 0$, genotipo estable; $b_i = 1$, $S^2d_i > 0$, buena respuesta en todos los ambientes, inconsistente; $b_i < 1$, $S^2d_i = 0$, mejor respuesta en ambientes desfavorables, consistente; $b_i < 1$, $S^2d_i > 0$, mejor respuesta en ambientes desfavorables, inconsistente; $b_i > 1$, $S^2d_i = 0$, mejor respuesta en buenos ambientes, consistente; $b_i > 1$, $S^2d_i > 0$, mejor respuesta en buenos ambientes, inconsistente. [†]Diferencia significativa honesta. Cifras con diferente letra en cada columna son iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

deseables de adaptación en una variedad comercial de trigo (*Triticum aestivum* L.): uno asociado con alto rendimiento y efectos mínimos de interacción genotipo×ambiente y otro con buena respuesta en ambientes favorables debido a efectos positivos de la interacción.

Comportamiento dentro de grupos y entre genotipos

En los análisis de estabilidad de los mejores genotipos de cada grupo, en los tres experimentos de riego, en promedio 50 y 39 % de ellos presentó estabilidad para rendimiento de grano y precocidad; observándose un híbrido (28×34) de 1^a generación y tres (9×19, 1×19 y 7×16) de 2^a generación, que resultaron estables y consistentes para ambos caracteres (Cuadro 6). Si el concepto “variedad deseable” se extiende a otras características deseables, como lo sugieren Carballo y Márquez (1970); en este caso, a un genotipo estable y de igual o mayor precocidad que VA-110, entonces los híbridos 9×19, 1×19 y 7×16 de 2^a generación fueron deseables para rendimiento y precocidad. El criterio “variedad deseable” también ha sido aplicado al evaluar la estabilidad, por ejemplo en: días a floración y altura de planta en sorgo (Torres y Williams, 1988), decoloración de grano en arroz (*Oryza sativa* L.) (Gravois y Bernhardt, 2000) y color de grano en trigo (Matus-Cádiz *et al.*, 2003), además del rendimiento de grano. Si bien otros genotipos, como las Líneas 9 (B-2) y 16 (R-2) y la variedad VA-110, resultaron estables para rendimiento, no fueron deseables por su menor producción; igualmente la Línea 20 (R-2) expresó estabilidad en precocidad, pero tampoco fue deseable pues resultó 4 d más tardía que VA-110. Por tanto, la gama de respuestas de los genotipos, además de su condición estable o deseable, permite la selección final de los potenciales genotipos comerciales de mayor interés para diversas condiciones ambientales, como lo sugieren Coutiño-Estrada y Vidal-Martínez (2003) y Rodríguez-Pérez *et al.* (2005).

Finalmente, el comportamiento de las líneas (B y R) y los híbridos de sorgo tolerantes al frío de 2^a generación, en condiciones de riego y secano de la Mesa Central de México, evidencian que se dispone de germoplasma nuevo TF que, ya se puede validar en forma semi-comercial en la región y aprovecharse a través del intercambio de germoplasma con instituciones de otras regiones del país, por ejemplo, El Bajío y Tamaulipas, al establecer programas de hibridación y criterios de selección específicos en cada región de interés, para incrementar la adaptabilidad del sorgo.

of 50 and 39 % of them showed stability for grain yield and earliness. One 1st generation hybrid (28×34) and three 2nd generation ones (9×19, 1×19 and 7×16) were stable and consistent for both traits (Table 6). If the concept of “desirable variety” extends to other desirable characters, as Carballo and Márquez (1970) suggest, *i.e.*, a stable genotype with the same or earlier flowering than VA-110, then the 2nd generation 9×19, 1×19 and 7×16 hybrids were desirable for yield and earliness. The criterion “desirable variety” has also been used to evaluate stability, for example in: days to flower and plant height in sorghum (Torres and Williams, 1988), grain decoloration in rice (*Oryza sativa* L.) (Gravois and Bernhardt, 2000) and grain color in wheat (Matus-Cádiz *et al.*, 2003), in addition to grain yield. Although other genotypes, such as Lines 9 (B-2) and 16 (R-2) and VA-110, were stable for yield, they were not desirable because of their low grain production. Likewise, Line 20 (R-2) showed stability for earliness, but it was not desirable because it turned out to be 4 d later than VA-110. Therefore, the range of the genotypic responses, in addition to its stable or desirable condition, allows the final selection of potential commercial genotypes of greater interest for several environmental conditions, as suggested by Coutiño-Estrada and Vidal-Martínez (2003), and Rodríguez-Pérez *et al.* (2005).

Finally, the behavior of the sorghum lines (B- and R-) and 2nd generation cold tolerant hybrids, under irrigated and rain fed conditions in the Central Plateau in México, show that there is new CT germplasm that can be validated in semi-commercial plots in the region. This germplasm can also be utilized through exchange programs with institutions of other regions in the country, *i.e.*, the Bajío and Tamaulipas, when setting up hybridation methods and specific selection criteria in each region of interest, in order to increase sorghum adaptability.

CONCLUSIONS

Sorghum cold tolerant 2nd generation hybrids and parental lines had earlier flowering, greater grain yield and better agronomic traits than those of the 1st generation and the best tester, VA-110. The 2nd generation R- lines showed higher yield and earliness than the 1st generation R-'s; the 2nd generation B- lines were earlier f than the 1st generation B-'s and VA-110. The average yield of the top ten 2nd generation hybrids, in the three irrigated and the two rain fed experiments, was equivalent to 7.97 and 2.49 t ha⁻¹, respectively. Only the 2nd generation hybrids showed stability parameters for yield within the category of desirable; in particular, the 9×19,

Cuadro 6. Parámetros de estabilidad para rendimiento de grano y días a floración de los genotipos de sorgo tolerantes al frío de mayor rendimiento de cada grupo. Promedio de tres localidades de Valles Altos de México, con riego.
Table 6. Stability parameters for grain yield and days to flower of the top cold tolerant sorghum genotypes for yield in each group. Averages of three locations in the Mexican High Valleys, under irrigation.

Grupo	Rendimiento (g/planta)	b_i	S^2d_i	Floración (d)	b_i	S^2d_i
Híbridos de 2ª generación (H's-2)						
9×19	58.47 a	2.01 = 1	12.15 = 0	93 e-h	1.08 = 1	-0.58 = 0
9×22	58.24 a	2.12 = 1	30.70 > 0	92 f-i	0.84 < 1	-0.73 = 0
1×19	58.11 a	3.00 = 1	8.09 = 0	90 h-j	1.00 = 1	0.06 = 0
9×17	56.96 a	2.97 > 1	-2.56 = 0	92 f-i	0.97 = 1	-0.61 = 0
11×17	56.84 a	5.84 > 1	-2.42 = 0	91 g-j	1.25 = 1	12.39 > 0
1×22	54.45 ab	3.05 > 1	-1.75 = 0	90 h-j	1.21 > 1	-0.09 = 0
7×16	53.99 ab	1.92 = 1	-3.51 = 0	89 ij	0.95 = 1	-0.76 = 0
7×17	53.89 ab	1.30 = 1	-4.11 = 0	88 j	1.18 > 1	-0.88 = 0
9×23	53.58 ab	3.87 > 1	-0.95 = 0	95 c-f	0.95 = 1	-0.63 = 0
1×17	53.36 ab	2.40 = 1	3.47 = 0	90 h-j	1.29 > 1	-0.08 = 0
Híbridos de 1ª generación (H's-1)						
28×33	42.56 cd	-0.57 = 1	49.92 > 0	97 b-d	0.67 < 1	-0.65 = 0
28×34	42.33 cd	1.71 = 1	-0.77 = 0	96 b-e	0.82 = 1	0.40 = 0
Líneas R de 2ª generación (R's-2)						
20	48.74 bc	2.72 > 1	-4.41 = 0	98 bc	0.98 = 1	-0.11 = 0
16	48.10 bc	0.80 = 1	-3.52 = 0	95 c-f	0.88 < 1	-0.91 = 0
Línea R de 1ª generación (R-1)						
34	32.20 e	-1.14 < 1	-2.86 = 0	99 b	0.94 = 1	5.36 > 0
Línea B de 2ª generación (B-2)						
9	31.13 ef	2.26 = 1	-0.76 = 0	95 c-f	0.86 < 1	-0.90 = 0
Línea B de 1ª generación (B-1)						
29	26.27 f	2.58 > 1	-3.13 = 0	94 d-g	1.21 > 1	-0.63 = 0
Testigo TF						
VA-110	30.96 ef	-0.42 = 1	13.06 = 0	94 d-g	0.84 = 1	4.08 > 0
Otros						
L-88	35.54 de	1.44 = 1	-1.85 = 0	93 e-h	1.15 > 1	-0.76 = 0
Purépecha	23.91 f	7.45 > 1	0.20 = 0	118 a	-0.06 < 1	20.84 > 0
RB-4000	2.94 g	1.01 = 1	-4.06 = 0	121 a	0.50 < 1	-0.38 = 0
DSH†	7.79			3.47		

$b_i=1, S^2d_i=0$, genotipo estable; $b_i=1, S^2d_i>0$, buena respuesta en todos los ambientes, inconsistente; $b_i<1, S^2d_i=0$, mejor respuesta en ambientes desfavorables, consistente; $b_i<1, S^2d_i>0$, mejor respuesta en ambientes desfavorables, inconsistente; $b_i>1, S^2d_i=0$, mejor respuesta en buenos ambientes, consistente; $b_i>1, S^2d_i>0$, mejor respuesta en buenos ambientes, inconsistente. †Diferencia significativa honesta. Cifras con diferente letra en cada columna son diferentes (Tukey, $p\leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Los híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío de 2ª generación fueron más precoces, de mayor rendimiento de grano y mejores características agronómicas que los de la 1ª y que el mejor testigo VA-110. Las líneas R de 2ª generación presentaron mayor rendimiento y precocidad que las R de la 1ª; las líneas B de 2ª generación fueron más precoces que las B de la 1ª y que VA-110. El rendimiento promedio de los 10 mejores híbridos de 2ª generación, en los tres experimentos de riego y los dos de seco fue equivalent-

1×19 and 7×16 hybrids were also desirable for earliness.

—End of the English version—



te a 7.97 y 2.49 t ha⁻¹, respectivamente. Solamente los híbridos de 2ª generación presentaron parámetros de estabilidad para rendimiento con la categoría de deseables, y en particular los híbridos 9×19, 1×19 y 7×16 fueron deseables también para precocidad.

LITERATURA CITADA

- Brancourt-Hulmel, M., and C. Lecomte. 2003. Effect of environmental variates on genotype×environment interaction of winter wheat: a comparison of biadditive factorial regression to AMMI. *Crop Sci.* 43: 608-617.
- Carballo C., A. y F. Márquez S. 1970. Comparación de variedades de maíz de El Bajío y la Mesa Central por su rendimiento y estabilidad. *Agrociencia* 5: 129-146.
- Cisneros-López, M. E., L. E. Mendoza-Onofre, G. Mora-Aguilera, L. Córdova-Téllez, and M. Livera-Muñoz. 2007. Cold tolerant sorghum hybrids and parental lines. I: Seed quality and its effects on seedling establishment. *Agrociencia* 41: 45-55.
- Coutiño-Estrada, B., and V. A. Vidal-Martínez. 2003. Grain yield stability of corn hybrids using best linear unbiased predictors. *Agrociencia* 37: 605-616.
- Eberhart, S. A., and W. A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.
- Gravois, K. A., and J. L. Bernhardt. 2000. Heritability and genotype×environment interactions for discolored rice kernels. *Crop Sci.* 40: 314-318.
- Hammer, G. L., and R. L. Vanderlip. 1989. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum. III. Modeling the impact in field environments. *Crop Sci.* 29: 385-391.
- Hammer, G. L., R. L. Vanderlip, G. Gibson, L. J. Wade, R. G. Hanzell, D. R. Younger, J. Warren, and A. B. Dale. 1989. Genotype-by-environment interaction in grain sorghum. II. Effects of temperature and photoperiod on ontogeny. *Crop Sci.* 29: 376-384.
- Hausmann, B. I. G., A. B. Obilana, P. O. Ayiecho, A. Blum, W. Schipprack, and H. H. Geiger. 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in semi-arid area of Kenya. *Crop Sci.* 40: 319-329.
- León V., H., L. E. Mendoza O., M. Livera M., and J. A. Estrada G. 1998. Phenology, seed yield and seed quality of cold tolerant sorghum restorer lines. *Agrociencia* 32: 339-347.
- Maman, N., S. C. Mason, D. J. Lyon, and P. Dhungana. 2004. Yield components of pearl millet and grain sorghum across environments in the Central Great Plains. *Crop Sci.* 44: 2138-2145.
- Mastache L., Á. A., y Á. Martínez G. 1998. Un algoritmo computacional para obtener los indicadores de estabilidad de Eberhart y Russell. *Comunicaciones en Socioeconomía, Estadística e Informática*. Vol. 2. Colegio de Postgraduados. México. 30 p.
- Matus-Cádiz, M. A., P. Hucl, C. E. Perron, and R. T. Tyler. 2003. Genotype×environment interaction for grain colour in hard white spring wheat. *Crop Sci.* 43: 219-226.
- Mendoza O., L. E. 1983. Estudios fisiotécnicos de sorgo realizados en el Colegio de Postgraduados (México). *Fitotecnia* 5: 108-138.
- Mendoza-Onofre, L. E. 1992. Grain yield of the first cold tolerant sorghum hybrids developed in México. *Sorghum Newsletter* 33: 62.
- Osuna-Ortega, J., L. E. Mendoza-Onofre, V. A. González-Hernández, F. Castillo-González, M. del C. Mendoza-Castillo, and H. Williams-Alanís. 2000. Potential of cold tolerant germplasm in the adaptation and adaptability of sorghum in México: I. High Valleys. *Agrociencia* 34: 561-572.
- Peterson, C. J., J. M. Moffatt, and J. R. Erickson. 1997. Yield stability of hybrid vs. pureline hard winter wheats in regional performance trials. *Crop Sci.* 37: 116-120.
- Rodríguez-Pérez, J. E., J. Sahagún-Castellanos, H. E. Villaseñor-Mir, J. D. Molina-Galán, and Á. Martínez-Garza†. 2005. Interaction genotype×environment in the characterization of rainfed areas for wheat. *Agrociencia* 39: 51-64.
- SAS (Statistical Analysis System). 1999-2000. Version 8.1. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Stagenborg, S. A., and R. L. Vanderlip. 1996. Sorghum grain yield reductions caused by duration and timing of freezing temperatures. *Agron. J.* 88: 473-477.
- Torres M., J. H. y H. Williams A. 1988. Estabilidad del rendimiento, altura de planta y floración de híbridos experimentales y comerciales de sorgo. *Rev. Fitotec. Mex.* 11: 185-198.
- Valadez-Gutiérrez, J., L. E. Mendoza-Onofre, H. Vaquera-Huerta, L. Córdova-Téllez, M. del C. Mendoza-Castillo, and G. García-de los Santos. 2006. Flowers thinning, seed yield and post-anthesis dry matter distribution in sorghum. *Agrociencia* 40: 303-314.