

SELECCIÓN RECÍPROCA RECURRENTE EN POBLACIONES DE MAÍZ DE VALLES ALTOS EN SUELOS CON ALTO Y BAJO CONTENIDO DE NITRÓGENO, EN MÉXICO

RECIPROCAL RECURRENENT SELECTION IN MEXICAN HIGHLAND VALLEYS MAIZE POPULATIONS UNDER HIGH AND LOW SOIL NITROGEN CONTENT

Esaú del Carmen Moreno-Pérez¹, David Lewis-Beck², Tarcicio Cervantes-Santana³ y José L. Torres-Flores²

¹Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo Méx. Km. 34.5 Carr. México- Texcoco. 56230. Fax: 01(595) 95 21642. ²Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Lisboa 27. Apartado Postal 6-641. 06600, México, D.F. ³Programa en Genética. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (mope65@correo.chapingo.mx)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de dos ciclos de selección recíproca recurrente realizados en las poblaciones 902 (A) y 903 (B) de maíz (*Zea mays* L.), de Valles Altos, México, provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), en suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno. Con los ciclos 0, 1 y 2 de selección en las poblaciones A y B se formaron nueve cruces $A_i \times B_j$ ($i, j =$ ciclo 0, 1, 2). La generación F_2 del ciclo i de la población A y del ciclo j de la población B, las cruces $A_i \times B_j$ y los testigos ACROSS96902, ACROSS96903, CMS929001, ASPROS721 y CMS939083, se evaluaron en suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno en El Batán, México y en suelos con alto contenido de nitrógeno en Montecillo, México, en 2000 y 2001. El diseño experimental usado fue bloques completos al azar con tres repeticiones. El rendimiento de grano promedio de las cruces $A_i \times B_j$ (8.24 t ha^{-1}) no fue estadísticamente diferente al de los testigos (8.45 t ha^{-1}), y las poblaciones B_j fueron las de menor rendimiento (5.55 t ha^{-1}). No hubo diferencias significativas entre genotipos de cada población. La ganancia en rendimiento de grano por ciclo de selección no fueron significativas y la heterosis respecto al progenitor medio tampoco lo fue.

Palabras clave: *Zea mays* L., heterosis, mejoramiento poblacional.

INTRODUCCIÓN

Mediante el mejoramiento genético se han obtenido variedades mejoradas de maíz (*Zea mays* L.) de polinización libre e híbridos de alto rendimiento (Duvick, 1984). Las metodologías de selección se dividen en intra e interpopulacionales (Hallauer y Miranda, 1988); en las primeras se aprovecha la varianza genética aditiva y en las segundas las varianzas aditiva y de dominancia. Este es el caso de la selección recíproca recurrente (Comstock *et al.*, 1949), que ha sido eficaz

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate two cycles of reciprocal recurrent selection in Highland Valley maize (*Zea mays* L.) populations 902 (A) and 903 (B), from the International Maize and Wheat Improvement Center of (CIMMYT) in soils with high and low nitrogen content. Using selection cycles 0, 1 and 2 of populations A and B, nine crosses $A_i \times B_j$ ($i, j =$ cycle 1, 2, 3) were formed. The F_2 generation of cycle i of the A population and cycle j of the B population, the $A_i \times B_j$ crosses, plus ACROSS96902, ACROSS96903, CMS929001, ASPROS721 and CMS939083 as controls, were evaluated in soils with high and low nitrogen at El Batán, México, and in high nitrogen soils at Montecillo, México, in 2000 and 2001. The experimental design was a randomized complete block with three replications. The average yield of the crosses $A_i \times B_j$ (8.24 t ha^{-1}) was not statistically different from the controls (8.45 t ha^{-1}), and populations B_j had the lowest yield (5.55 t ha^{-1}). No significant differences were found between genotypes of the two populations. Improvement in grain yield per cycle of selection was not significant and nor was heterosis for average parent.

Key words: *Zea mays* L., heterosis, population improvement.

INTRODUCTION

Improved varieties of open pollination and high-yield maize (*Zea mays* L.) have been obtained through genetic improvement (Duvick, 1984). Selection methods are divided into intra and interpopulation methods (Hallauer and Miranda, 1988). In the former, additive genetic variance is used and in the latter additive and dominance variances are used. This is the case of reciprocal recurrent selection (Comstock *et al.*, 1949), which has been effective for improving grain yield *per se* of maize populations, especially of their crosses (Keeratinijakal and Lamkey, 1993; Menz *et al.*, 1999).

Thus, high maize yields have been achieved in high production agricultural systems; even so, it is necessary

Recibido: Noviembre, 2002. Aprobado: Enero, 2004.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 38: 305-311. 2004.

para mejorar el rendimiento de grano *per se* de poblaciones de maíz, sobre todo de sus cruzas (Keeratinijakal y Lamkey, 1993; Menz *et al.*, 1999).

Así se han logrado altos rendimientos de maíz en sistemas agrícolas de alta producción, pero aún es necesario incrementar el rendimiento en las grandes áreas agrícolas marginales con suelos de baja fertilidad carentes, principalmente, de nitrógeno (Bänziger y Lafitte, 1997). Para ello se requiere aumentar la aptitud combinatoria general de las poblaciones base y la divergencia genética entre las mismas, para que sus cruzas tengan mayor heterosis. Según Falconer y Makay (1996), heterosis es la diferencia del valor de la cruce F_1 menos la media de sus progenitores y, de acuerdo con Prasad y Singh (1986), y Melchinger (1999), depende de la divergencia genética entre progenitores.

El objetivo de este trabajo fue evaluar dos ciclos de selección recíproca recurrente en dos poblaciones de maíz blanco precoz de Valles Altos, en suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno. La hipótesis fue que las poblaciones poseen variabilidad genética y son divergentes, por lo que la selección tendrá éxito.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las poblaciones 902 y 903 (A y B) de maíz de Valles Altos, provenientes del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), se efectuaron dos ciclos de selección recíproca recurrente (Comstock *et al.*, 1949). La Población A se formó mediante recombinación de 18 líneas S_3 y S_4 de alta aptitud combinatoria específica (ACE) con la línea CML246. La B se formó recombinando 25 líneas de alta ACE con la línea CML242. La mayoría de las líneas que formaron la Población A y la CML242 derivaron de la Población 85 del CIMMYT, y la mayoría de las líneas que formaron la Población B y la línea CML246 provinieron de la Población 800 del CIMMYT. La cruce CML246×CML242 fue la mejor cuando se formaron las poblaciones A y B.

De las poblaciones originales A (A_0) y B (B_0) se obtuvieron aproximadamente 380 líneas S_1 , y fueron avanzadas a la generación S_3 . Se formaron 316 mestizos mediante la cruce de 316 líneas S_1 de A_0 con B_0 , y 307 líneas S_1 de B_0 se cruzaron con A_0 para formar 307 mestizos B.

Los mestizos A y B, y las líneas S_2 derivadas de cada población se evaluaron en suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno, en El Batán, Estado de México (19° 52' N y 98° 87' de O, a 2267 m), así como en dos suelos con alto contenido de nitrógeno: en Toluca, Estado de México (19° 18' N y 99° 40' O, a 2680 m) y en Pabellón, Aguascalientes, México (22° 18' N y 102° 30' O, a 1952 m). El ciclo 1 de selección de las poblaciones A_1 y B_1 se formó por recombinación de 40 líneas S_3 de A_0 y B_0 , seleccionadas con base en los mestizos de mayor rendimiento y por el buen rendimiento *per se* de las líneas S_2 . En forma similar se formó el ciclo 2 de selección de las poblaciones, A_2 y B_2 , pero el probador de las líneas de A_1 fue ACROSS96903 (variedad sintética derivada de B_0), y el de las líneas de B_1 fue

to increase yield in the large marginal agricultural areas with low fertility soils that lack, principally, nitrogen (Bänziger and Lafitte, 1997). For this, increasing the general combining ability of the base populations and genetic divergency among them is required so that the crosses have greater heterosis. According to Falconer and Makay (1996), heterosis is the difference between the value of the F_1 cross and the mean of its progenitors and, according to Prasad and Singh (1986) and Melchinger (1999), depends on the genetic divergence among progenitors.

The objective of this study was to evaluate two cycles of reciprocal recurrent selection in two early white maize populations for the Highland Valleys in soils with high and low content of nitrogen. The hypothesis was that the populations have genetic variability and are divergent, and thus the selection will be successful.

MATERIALS AND METHODS

In the High Valleys maize populations 902 and 903 (A and B) from the International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) two cycles of reciprocal recurrent selection was performed (Comstock *et al.*, 1949). Population A was formed by recombination of 18 S_3 and S_4 lines of high specific combining ability (ACE) with line CML246. Population B was formed by recombining 25 high ACE lines with line CML242. Most of the lines that formed population A and line CML242 were derived from Population 85 of CIMMYT, and most of the lines that formed Population B and line CML246 came from Population 800 of CIMMYT. The cross CML246×CML242 was the best when populations A and B were formed.

Approximately 380 S_1 lines were obtained from the original populations A (A_0) and B (B_0); these were advanced to generation S_3 . Three hundred sixteen mestizos were formed by means of the cross of 316 S_1 lines from A_0 with B_0 , and 307 S_1 lines from B_0 were crossed with A_0 to form 307 B mestizos.

Mestizos A and B, and the S_2 lines derived from each population were evaluated in soils with high and low content of nitrogen at El Batán, State of México (19° 52' N and 98° 87' W, at 2267 m), and in two soils with high content of nitrogen: at Toluca, State of México (19° 18' N and 99° 40' W, at 1952 m) and at Pabellón, Aguascalientes, México (22° 18' N and 102° 30' W, at 1952 m). In selection cycle 1, populations A_1 and B_1 were formed by recombination of 40 S_3 lines from A_0 and B_0 , selected on the basis of higher yielding mestizos and of the good yield *per se* of the S_2 lines. In a similar way selection cycle 2 of populations A_2 and B_2 was formed, but the tester of the A_1 lines was ACROSS96903 (synthetic variety derived from B_0), and that of the B_1 lines was ACROSS96902 (synthetic variety derived from A_0). These mestizos and the S_2 lines were evaluated in the same environments and locations indicated, except in Toluca.

The F_1 generation of the selection cycles i and j (i, j=cycle 0, 1, 2) of the populations A (A_0 , A_1 , and A_2) and B (B_0 , B_1 and B_2) was advanced to F_2 . Later, the F_2 generation of cycle i (i=0, 1, and 2) from populations A_0 , A_1 and A_2 was crossed with F_2 of the j cycle (j=0, 1

ACROSS96902 (variedad sintética derivada de A_0). Estos mestizos y las líneas S_2 se evaluaron en los mismos ambientes y localidades indicados, excepto en Toluca.

La generación F_1 de los ciclos de selección i y j ($i, j =$ ciclo 0, 1, 2) de las poblaciones A (A_0, A_1 y A_2) y B (B_0, B_1 y B_2), fue avanzada a F_2 . Posteriormente, la F_2 del ciclo i ($i = 0, 1$ y 2) de las poblaciones A_0, A_1 y A_2 se cruzaron con la F_2 del ciclo j ($j = 0, 1$ y 2) de las poblaciones B_0, B_1 y B_2 , y se formaron nueve cruza $A_i \times B_j$.

Las F_2 de las poblaciones A_i y B_j , las cruza $A_i \times B_j$ y los testigos T1 (ACROSS96902), T2 (ACROSS96903), T3 (CMS929001, cruza simple de CML246×CML242 del CIMMYT), T4 (ASPROS721, híbrido de tres líneas de la empresa ASPROS) y T5 (CMS939083, cruza simple de CML244×CML349 del CIMMYT), se evaluaron en los veranos de 2000 y 2001. Se establecieron cuatro experimentos cada año: tres en El Batán, México (en suelo con alto contenido de nitrógeno y en condiciones de temporal o secano; en suelo con bajo contenido de nitrógeno y riego; y en suelo con contenido alto de nitrógeno y riego), y uno en suelo con contenido alto de nitrógeno y riego en Montecillo, México (19° 29' N y 98° 54' O, a 2250 m). El diseño experimental fue bloques completos al azar con tres repeticiones, en parcelas experimentales de dos surcos de 5 m de longitud. La distancia entre surcos fue 76 cm y 20 cm entre plantas, salvo en el experimento de alto nitrógeno en temporal en 2001, donde la distancia entre plantas fue 12.5 cm.

La fertilización en El Batán fue 150N-40P-00K, y en Montecillo 140N-60P-00K. En ambos sitios se aplicó la mitad del nitrógeno y todo el fósforo en la siembra, y la segunda mitad de nitrógeno 40 d después. El suelo de bajo nitrógeno se logró al sembrar maíz en el ciclo de verano durante los siete años anteriores, sin incorporación de los residuos de la cosecha en algunos años, y sin fertilización en todos.

Los caracteres medidos fueron días a floración masculina (DF), altura de planta (AP) y rendimiento de grano (RG) ajustado a 13% de humedad. Debido a la variación del suelo, en particular en el de bajo contenido de nitrógeno, cada bloque se dividió en cuatro subbloques de cinco tratamientos cada uno, y el valor de DF, AP y RG de cada parcela se ajustó por el valor promedio del subbloque y del bloque al que pertenecía (Molina, 1979).

Para cada variable se hizo análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). La respuesta a la selección (R) de los ciclos de selección en las poblaciones A_i y B_j y en sus cruza $A_i \times B_j$ ($i, j =$ ciclo 0, 1, 2), se calculó como $R = 100b_1/Y_0$, donde b_1 es el coeficiente de regresión del carácter sobre ciclos de selección, y Y_0 es la media de la población original $A_0, B_0, A_0 \times B_0$, según el caso (Molina, 1992).

El porcentaje de heterosis ($\%H_{ij}$) de una cruza $A_i \times B_j$ se calculó sustituyendo el rendimiento de cada cruza $A_i \times B_j$ (F_1) y el rendimiento promedio de los progenitores (MP), de acuerdo con Falconer y Makay (1996); es decir, $\%H_{ij} = [(F_1 - MP)/MP] \times 100$. También se calculó el coeficiente de regresión (b_1) de la heterosis sobre la media de los progenitores.

La aptitud combinatoria general (ACG) para rendimiento de grano de las poblaciones A_i y B_j , se calculó como el promedio del rendimiento de las cruza de cada ciclo A_i con todos los ciclos B_j , y de cada

and 2) of the B_0, B_1 and B_2 populations, and nine $A_i \times B_j$ crosses were formed.

The F_2 of the A_i and B_j populations, the $A_i \times B_j$ crosses and the controls T1 (ACROSS96902), T2 (ACROSS96903), T3 (CMS929001, simple cross from CML 246×CML242 from CIMMYT), T4 (ASPROS721, hybrid from three lines of the ASPROS Company) and T5 (CMS939083, simple cross of CML244×CML349 from CIMMYT) were evaluated in the summers of 2000 and 2001. Four experiments were set up each year: three at El Batán, México (in soil with high nitrogen content and under rainfed or dryland conditions; in soil with low nitrogen content and irrigation; and in soil with high nitrogen content and irrigation), and one in soil with high nitrogen content and irrigation at Montecillo, México (19° 29' N and 98° 54' W, at 2250 m). The experimental design was complete random blocks with three replications in experimental plots of two 5-m long rows. Distance between rows was 76 cm and 20 cm between plants, except in the experiment of high nitrogen in rainfed conditions in 2001, where the distance between plants was 12.5 cm.

Fertilization at El Batán was 150N-40P-00K, and 140N-60P-00K at Montecillo. In both sites half of the nitrogen and all of the phosphorus was applied at planting, and the second half of the nitrogen was applied 40 d later. The low nitrogen soil was achieved by planting maize in the summer cycle during the seven previous years without incorporating harvest residues in some years and without fertilization in any year.

The traits measured were days to male flowering (DF), plant height (AP) and grain yield (RG) adjusted to 13% moisture. Because of the variation in soil, particularly in the low nitrogen soil, each block was divided into four sub-blocks of five treatments each, and the value of DF, AP and RG of each plot was adjusted by the average value of the sub-block and of the block to which it belonged (Molina, 1979).

For each variable, analysis of variance and comparison of means with Tukey ($p \leq 0.05$) were performed. The response to selection (R) of the selection cycles in populations A_i and B_j and in their crosses $A_i \times B_j$ ($i, j =$ cycle 0, 1, 2), was calculated as $R = 100b_1/Y_0$, where b_1 is the regression coefficient of the trait over selection cycle, and Y_0 is the mean of the original population $A_0, B_0, A_0 \times B_0$, depending on the case (Molina, 1992).

The percentage of heterosis ($\%H_{ij}$) of an $A_i \times B_j$ cross was calculated by substituting the yield of each $A_i \times B_j$ (F_1) cross and the average yield of the progenitors (MP), following Falconer and Makay (1996), that is, $\%H_{ij} = [(F_1 - MP)/MP] \times 100$. The regression coefficient (b_1) of the heterosis over the mean of the progenitors was also calculated.

The general combining ability (ACG) for grain yield of the A_i and B_j populations was calculated as the average yield of the crosses of each A_i cycle with all of the B_j cycles, and of each B_j cycle with the A_i cycles, consistent with the definition of ACG of Sprague and Tatum (1942).

RESULTS AND DISCUSSION

In the average of environments, the controls were the latest (days to flowering) and tallest genotypes, and the B_j populations the shortest (Table 1). The grain yield of

ciclo B_j con los de A_i , de acuerdo con la definición de ACG de Sprague y Tatum (1942).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En promedio de ambientes, los testigos fueron los genotipos más tardíos (a floración) y más altos y las poblaciones B_j las de menor altura (Cuadro 1). El rendimiento de grano de las cruzas $A_i \times B_j$ no fue estadísticamente diferente al de los testigos, y las poblaciones B_j fueron las de menor rendimiento.

Los testigos T5 y T4 tuvieron mayor rendimiento, y ambos superaron en altura a T1; T3 y T4 fueron los más tardíos.

Ningún genotipo de las cruzas $A_i \times B_j$, o de las poblaciones A_i o B_j rindió más que el mejor testigo (T5), que produjo 9.61 t ha^{-1} . Entre genotipos de cada uno de los tres primeros grupos no hubo diferencias significativas; en el grupo de cruzas el rendimiento promedio fue 8.24 t ha^{-1} ; en el grupo de la población A_1 fue 7.84 t ha^{-1} ; y en el de la población B_2 fue 7.55 t ha^{-1} .

Al igual que en el promedio de suelos (Cuadro 1), con contenido alto de nitrógeno las cruzas $A_i \times B_j$ y los testigos fueron los mejores genotipos, las poblaciones A_i fueron intermedias, y las poblaciones B_j las peores (Cuadro 2). En suelos con bajo nitrógeno el comportamiento fue similar, excepto que el rendimiento de las poblaciones A_i no fue diferente al de las cruzas $A_i \times B_j$ y testigos, y que las poblaciones B_j rindieron menos respecto a estos dos últimos grupos.

En suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno sólo hubo diferencias estadísticas en rendimiento entre genotipos del grupo de testigos, donde T4 y T5 superaron a T1, T2 y T3.

Las ganancias en rendimiento de grano por ciclo de selección (coeficientes b_j) no resultaron significativas en ninguna de las dos poblaciones (A_i y B_j) y en ningún ambiente (Cuadro 3). El rendimiento sólo tendió a mejorar con la selección por ciclo: para A_i fueron 3.75, 3.33, 5.67%, y para B_j 4.51, 4.47 y 4.66%, con alto y bajo nitrógeno.

Estos incrementos son ligeramente mayores a los obtenidos para rendimiento por Eyherabide y Hallauer (1991), Keeratinijakal y Lamkey (1993) y Menz *et al.* (1999) a través de selección recíproca recurrente en maíz. Las bajas ganancias posiblemente se deben a que no sólo se seleccionó por rendimiento de grano, sino también para la sanidad, el aspecto de la planta y de la mazorca, el acame y la buena cobertura de la mazorca. Además, la selección de líneas para formar los nuevos ciclos de selección se hizo con base en el análisis combinado de alto y bajo nitrógeno y no para cada ambiente, y algunas líneas con las que se formaron las poblaciones A_0 y B_0 estaban emparentadas.

the $A_i \times B_j$ crosses was not statistically different from the controls, and the B_j populations had the lowest yield.

The T5 and T4 controls had higher yields, and both surpassed T1 in height; T3 and T4 were the latest.

No genotype of the $A_i \times B_j$ crosses, or of the A_i or B_j populations, yielded better than the best control (T5), which produced 9.61 t ha^{-1} . Among the genotypes of each of the first three groups there were significant differences. In the group of crosses, average yield was 8.24 t ha^{-1} ; in the group of the A_i population yield was 7.84 t ha^{-1} ; and in the B_2 population it was 7.55 t ha^{-1} .

Like in the average of soils (Table 1), with high nitrogen content, the A_i and B_j crosses and the controls were the best genotypes, the A_i populations were intermediate, and the B_j populations the worst (Table 2).

Cuadro 1. Medias de días a floración masculina (DF), altura de planta (AP) y rendimiento de grano (RG), de genotipos de maíz en promedio de suelos con alto y bajo nitrógeno. El Batán y Montecillo, Estado de México, 2000-2001.

Table 1. Means of days to male flowering (DF), plant height (AP) and grain yield (RG) of maize genotypes in average of high and low nitrogen soils. El Batán and Montecillo, State of México, 2000-2001.

Promedio de grupos y genotipos	DF (días)	AP (cm)	RG (t ha^{-1})
Cruzas $A_i \times B_j$	79.4B	195.2B	8.24A
$A_2 \times B_2$	78.8a	197.8a	8.69a
$A_2 \times B_1$	79.2a	198.8a	8.67a
$A_2 \times B_0$	80.3a	194.9a	8.37a
$A_1 \times B_1$	80.0a	193.5a	8.25a
$A_0 \times B_2$	78.4a	196.3a	8.21a
$A_0 \times B_0$	79.3a	195.4a	8.15a
$A_1 \times B_2$	79.4a	195.6a	8.03a
$A_0 \times B_1$	79.3a	192.6a	8.01a
$A_1 \times B_0$	79.6a	192.3a	7.77a
DSH _{0.05}	3.2	21.5	1.70
Poblaciones A_i	79.1B	192.9BC	7.84B
A_1	79.5a	193.5a	8.09a
A_2	79.8a	191.9a	7.99a
A_0	77.9b	193.4a	7.43a
DSH _{0.05}	1.5	15.7	1.35
Poblaciones B_j	78.4B	185.9C	7.55C
B_2	77.8a	191.7a	7.92a
B_1	79.0a	188.2a	7.45a
B_0	78.6a	177.8a	7.27a
DSH _{0.05}	2.8	16.5	1.41
Testigos	80.8A	206.1A	8.45A
T5 (CMS939083)	79.1b	215.6a	9.61a
T4 (ASPROS721)	83.1a	225.8a	9.29ab
T1 (ACROSS96902)	79.6b	189.5b	7.88b
T3 (CMS929001)	83.1a	207.5ab	7.87b
T2 (ACROSS96903)	79.2b	192.0ab	7.60bc
DSH _{0.05}	2.2	19.3	1.65
DSH _{0.05} (Grupos)	1.3	8.5	0.70
DSH _{0.05} (Genotipos)	3.5	23.6	1.96

DSH=Diferencia significativa honesta ($p=0.05$).

Medias de grupo con la misma letra mayúscula en la misma columna y con la misma letra minúscula dentro de cada grupo de genotipos en la misma columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuadro 2. Comparación de medias de días a floración masculina (DF), altura de planta (AP) y rendimiento de grano (RG) de genotipos de maíz, en suelos con alto y bajo contenido de nitrógeno. El Batán y Montecillo, Estado de México, 2000-2001.**Table 2. Comparison of means of days to male flowering (DF), plant height (AP) and grain yield (RG) of maize genotypes in soils of high and low content of nitrogen. El Batán and Montecillo, State of México, 2000-2001.**

Promedio de grupos y genotipos	DF (días)		AP (cm)		RG (t ha ⁻¹)	
	AN	BN	AN	BN	AN	BN
cruzas A _i ×B _j						
A ₂ ×B ₂	78.8B	81.1AB	198.9B	184.4B	8.96A	6.08A
A ₂ ×B ₁	78.3a	80.3a	201.7a	185.8a	9.42a	6.53a
A ₂ ×B ₀	78.7a	80.7a	202.0a	189.5a	9.38a	6.54a
A ₁ ×B ₁	79.8a	81.5a	199.6a	180.8a	9.00a	6.47a
A ₁ ×B ₀	79.4a	81.5a	196.8a	183.7a	9.02a	5.94a
A ₀ ×B ₂	77.7a	80.3a	199.9a	185.3a	8.98a	5.92a
A ₀ ×B ₁	78.7a	81.2a	199.0a	184.5a	8.88a	5.96a
A ₀ ×B ₀	78.7a	81.7a	197.9a	188.7a	8.75a	5.86a
DSH _{0.05}	78.6a	81.2a	196.1a	182.3a	8.74a	5.83a
Poblaciones A _i	79.1a	81.2a	196.8a	178.8a	8.47a	5.67a
A ₂	3.4	2.6	21.3	23.7	1.72	1.80
A ₁	78.5B	80.7B	196.1B	183.3BC	8.55B	5.71AB
A ₀	79.4a	81.2a	194.6a	184.0a	8.59a	6.19a
DSH _{0.05}	78.9a	81.0a	197.8a	180.3a	9.00a	5.37a
Poblaciones B _j	77.2a	80.0a	195.9a	185.7a	8.06a	5.56a
B ₂	2.3	2.9	16.5	16.3	1.49	1.06
B ₁	77.8C	80.3B	189.4C	175.5C	8.21C	5.57B
B ₀	77.2a	79.5a	196.4a	177.5a	8.60a	5.88a
DSH _{0.05}	78.4a	80.5a	191.7ab	177.7a	8.12a	5.45a
Testigos	77.8a	81.0a	179.9b	171.3a	7.90a	5.38a
T5 (CMS939083)	3.3	3.1	15.4	22.9	1.31	2.01
T4 (ASPROS721)	80.2A	82.6A	209.8A	194.9A	9.21A	6.18A
T1 (ACROSS96902)	78.4b	81.2b	218.7a	206.3a	10.50a	6.96a
T3 (CMS929001)	82.6a	84.5a	231.1a	209.7a	10.19a	6.59a
T2 (ACROSS96903)	79.1b	81.2b	193.9b	176.0b	8.49b	6.07a
DSH _{0.05}	82.6a	84.8a	209.9b	200.0ab	8.61b	5.64a
DSH _{0.05} (Grupos)	78.6b	81.2b	195.2b	182.5b	8.25b	5.65a
DSH _{0.05} (Genotipos)	2.3	2.3	19.3	21.4	1.63	1.35
	1.2	1.5	8.5	8.2	0.77	0.54
	3.6	3.4	23.4	25.1	1.97	2.01

AN = Alto nitrógeno; BN = Bajo nitrógeno; DSH = Diferencia significativa honesta ($p \leq 0.05$).

Medias de grupo con la misma letra mayúscula en la misma columna y con la misma letra minúscula dentro de cada grupo de genotipos en la misma columna, no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Los coeficientes de regresión del rendimiento respecto al número de ciclos de selección para las cruzas A_i×B_j, no fueron estadísticamente significativos (Cuadro 3). Las ganancias fueron 3.34, 3.04 y 4.84% por ciclo de selección en cada suelo (PA, AN y BN). Estas ganancias se atribuyen a que la divergencia genética entre las poblaciones A y B aumentó ligeramente con la selección, pero no en magnitud suficiente para inducir incrementos significativos del rendimiento en las cruzas, como ocurrió en los trabajos de Eyherabide y Hallauer (1991) y Keeratinijakal y Lamkey (1993). Los coeficientes de regresión de la heterosis del rendimiento de grano sobre la media de los progenitores tampoco fueron estadísticamente significativos.

La heterosis respecto a la media de los padres, en promedio de suelos, de las cruzas A₀×B₀, A₁×B₁ y A₂×B₂ (Cuadro 4) fue 10.88, 6.14 y 9.28%. Esos valores indican que no se logró incrementar la heterosis mediante selección, como lo obtuvieron otros autores al aplicar

With low nitrogen soils, performance was similar, except that the yield of the A_i populations was not different to that of the A_i×B_j crosses and controls, and that the B_j populations yielded less compared to the two latter groups.

With high and low nitrogen content soils, there were statistical differences in yield only between genotypes of the control groups, where T4 and T5 surpassed T1, T2, and T3.

The gains in grain yield per selection cycle (coefficients b₁) were not significant in either of the two populations (A_i and B_j) or in either environment (Table 3). Yield only tended to improve with selection per cycle: for A_i responses were 3.75, 3.33, 5.67%, and for B_j 4.51, 4.47, and 4.66%, in high and low nitrogen.

These increases are slightly higher than those obtained for yield by Eyherabide and Hallauer (1991), Keeratinijakal and Lamkey (1993) and Menz *et al.* (1999) with reciprocal recurrent selection in maize. The low gains may be due to the fact that selection was not only for

Cuadro 3. Valor del intercepto (b_0), coeficiente de regresión (b_1), coeficiente de determinación (R^2) y respuesta en % por ciclo de selección (R), para rendimiento de grano.

Table 3. Value of intercept (b_0), regression coefficient (b_1), coefficient of determination (R^2) and response in % per selection cycle (R), for grain yield.

Concepto	Ambiente	b_0	b_1	r^2	R(%)
A_i	PA	7.56	0.28	0.61	3.75
A_i	AN	8.28	0.27	0.32	3.33
A_i	BN	5.39	0.32	0.54	5.67
B_j	PA	7.22	0.33	0.94	4.51
B_j	AN	7.85	0.35	0.96	4.47
B_j	BN	5.32	0.25	0.86	4.66
C_{ij}	PA	8.09	0.27	0.88	3.34
C_{ij}	AN	8.84	0.27	0.93	3.04
C_{ij}	BN	5.86	0.28	0.72	4.84
H_{ij}	PA	5.00	-0.58	0.15	
H_{ij}	AN	7.86	-0.87	0.36	
H_{ij}	BN	-1.25	0.30	0.12	

A_i = Población A_i ; B_j = Población B_j ; C_{ij} = Cruza $A_i \times B_j$; H_{ij} = Heterosis de la craza $A_i \times B_j$; AN = Alto nitrógeno; BN = Bajo nitrógeno; PA = Promedio de AN y BN.

selección recíproca recurrente en maíz (Eyherabide y Hallauer, 1991; Keeratinijakal y Lamkey, 1993; Menz *et al.*, 1999).

La aptitud combinatoria general (ACG) de las poblaciones A_i y B_j tendió a crecer con la selección (Cuadro 5). En las poblaciones A_i , la ACG de A_2 creció 10.1% respecto a la de A_0 , en el suelo de bajo nitrógeno, y en las poblaciones B_j la ACG aumentó 3.1% sobre B_0 en suelo de alto nitrógeno. Pero en ambas poblaciones la ACG fue más alta (42 a 48%) en suelos de alto nitrógeno que en bajo nitrógeno.

CONCLUSIONES

Las poblaciones 902 y 903 mostraron alto rendimiento en suelo de alto o bajo contenido de nitrógeno. Los dos ciclos de selección recíproca recurrente no produjeron ganancias significativas, tal vez porque las poblaciones base no tienen suficiente variabilidad. Con la selección probablemente se acumularon genes favorables que produjeron un ligero aumento en la divergencia genética entre poblaciones, pero no en grado suficiente para que en las cruza se expresara alto rendimiento. En consecuencia, la heterosis fue baja y la selección no tuvo éxito.

Cuadro 5. Aptitud combinatoria general ($t \text{ ha}^{-1}$) de las poblaciones A_i y B_j con alto y bajo contenido de nitrógeno, y en promedio.

Población	Alto nitrógeno	Bajo nitrógeno	Promedio	Población	Alto nitrógeno	Bajo nitrógeno	Promedio
A_0	8.87	5.91	8.13	B_0	8.78	6.03	8.10
A_1	8.75	5.82	8.02	B_1	9.05	6.10	8.31
A_2	9.27	6.51	8.58	B_2	9.05	6.11	8.31
Ganancia (%)	3.9	10.1	5.5		3.1	1.3	2.6

Cuadro 4. Heterosis en $t \text{ ha}^{-1}$ y en porcentaje, de las cruza $A_i \times B_j$ sobre la media de los padres.

Table 4. Heterosis in $t \text{ ha}^{-1}$ and percentage of the $A_i \times B_j$ crosses over the mean of the parents.

Cruza	Alto nitrógeno		Bajo nitrógeno		Promedio	
	$t \text{ ha}^{-1}$	%	$t \text{ ha}^{-1}$	%	$t \text{ ha}^{-1}$	%
$A_0 \times B_0$	0.90	11.31	0.49	8.98	0.80	10.88
$A_1 \times B_1$	0.46	5.37	0.53	9.72	0.48	6.14
$A_2 \times B_2$	0.82	9.54	0.49	8.15	0.74	9.28

grain yield but also for health, the appearance of the plant and ear, uprightiness, and good cover on the ear. Also, the selection of lines to form new selection cycles was done on the basis of the combined analysis of high and low nitrogen and not for each environment, and some of the lines that formed populations A_0 and B_0 were related.

The regression coefficients for yield regarding the number of selection cycles for the $A_i \times B_j$ crosses were not statistically significant (Table 3). The gains were 3.34, 3.04 and 4.84% per selection cycle in each soil (PA, AN and BN). These gains were attributed to the fact that genetic divergence between populations A and B increased slightly with selection, but the magnitude was not enough to induce significant increases in the yield of the crosses, as occurred in the studies of Eyherabide and Hallauer (1991) and Keeratinijakal and Lamkey (1993). The regression coefficients of the heterosis of grain yield over the mean of the progenitors were also not significant.

Heterosis, relative to the mean of the parents in the average of soils, of the crosses $A_0 \times B_0$, $A_1 \times B_1$ and $A_2 \times B_2$ (Table 4) were 10.88, 6.14 and 9.28%. These values indicate that increases in heterosis were not achieved through selection, as other authors have obtained by applying reciprocal recurrent selection in maize (Eyherabide and Hallauer, 1991; Keeratinijakal and Lamkey, 1993; Menz *et al.*, 1999).

The general combining ability (ACG) of the A_i and B_j populations tended to increase with selection (Table 5). In the A_i populations, ACG of A_2 grew 10.1%, relative to A_0 , in the low nitrogen soil, and in the B_j populations ACG increased 3.1% above B_0 in high nitrogen soil. But in both populations ACG was higher (42% to 48%) in high nitrogen than in low nitrogen soil.

LITERATURA CITADA

- Bänziger, M., and H. R. Lafitte. 1997. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Sci.* 37: 1110-1117.
- Comstock, R. E., H. F. Robinson, and P. H. Harvey. 1949. A breeding procedure designed to make maximum use of both general and specific combining ability. *Agron. J.* 41: 360-367.
- Duvick, D. N. 1984. Genetic contributions to yield gains of U.S. hybrid maize, 1930 to 1980. *In: Genetic Contributions to Yield Gains of Five Major Crop Plants.* Fehr, W. R. (ed). CSSA, ASA, Madison, WI. pp: 15-47.
- Eyherabide, G. H., and A. R. Hallauer. 1991. Reciprocal full-sib recurrent selection in maize. I. Direct and indirect responses. *Crop Sci.* 31: 952-959.
- Falconer, D. S., and T. F. C. Makay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics.* 4th ed. Longman, England. pp: 235-240.
- Hallauer, A. R., and B. Miranda F. 1988. *Quantitative Genetics in Maize Breeding.* 2nd ed. Iowa State Univ. Press/Ames. 468 p.
- Keeratinijakal, V., and K. R. Lamkey. 1993. Responses to reciprocal selection in BSSS and BSCB1 maize populations. *Crop Sci.* 33: 73-77.
- Melchinger, A. E. 1999. Genetic diversity and heterosis. *In: The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops.* Coors, J. G. and S. Pandey (eds). American Society of Agronomy, Inc. and Crop Science Society of America, Inc. pp: 99-118.
- Menz, A. M. R., A. R. Hallauer, and W. A. Russell. 1999. Comparative response of two reciprocal recurrent selection methods in BS21 and BS22 maize populations. *Crop Sci.* 39: 89-97.

CONCLUSIONS

Populations 902 and 903 exhibited high yield in high and low nitrogen soil. The two cycles of reciprocal recurrent selection did not produce significant gains, possibly because the base populations did not have sufficient variability. With selection, favorable genes probably accumulated and produced a slight increase in the genetic divergency among populations, but not to a degree sufficient enough to express high yield. In consequence, heterosis was low and the selection was not successful.

—End of the English version—



- Molina G., J. D. 1979. Selección familiar de progenies autofecundadas. *Agrociencia* 37: 131-138.
- Molina G., J. D. 1992. *Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa.* AGT Editores. México, D. F. 337 p.
- Prasad, S. K., and T. P. Singh. 1986. Heterosis in relation to genetic divergency in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica* 35: 919-924.
- Sprague, G. F., and L. A. Tatum 1942. General and specific combining ability in single crosses of corn. *J. Am. Soc. Agron.* 34: 923.