

CRITERIOS PARA ELEGIR EL MEJOR PROBADOR DE LA APTITUD COMBINATORIA GENERAL PARA RENDIMIENTO DE GRANO DE LÍNEAS AUTOFECUNDADAS DE MAÍZ

CRITERIA TO CHOOSE THE BEST TESTER OF THE GENERAL COMBINING ABILITY FOR GRAIN YIELD OF MAIZE INBRED LINES

Ricardo Lobato-Ortiz*, José D. Molina-Galán, José de J. López-Reynoso,
José A. Mejía-Contreras, Delfino Reyes-López

Genética, Campus Montecillo, Colegio de Postgrados. Km 36.5 Carretera México-Texcoco
56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México (rlobato@colpos.mx).

RESUMEN

En un programa de mejoramiento genético por hibridación de maíz (*Zea mays* L.) es importante disponer de un probador confiable y eficiente de la aptitud combinatoria general (ACG) de líneas autofecundadas de maíz. Con el propósito de aportar más evidencia experimental relativa a la identificación del mejor probador de la ACG de líneas autofecundadas de maíz, en el presente trabajo se usaron 50 líneas S_1 derivadas de la variedad Compuesto Universal original (variedad original), más cuatro líneas de alta y cuatro de baja ACG derivadas de las poblaciones de maíz Xolache y Mex. Gpo. 10. Las líneas S_1 fueron cruzadas con tres probadores: una línea de baja ACG (P1), una línea de alta ACG (P2) y la variedad original (P3). La hipótesis fue que la línea de baja ACG es el mejor probador. Para evaluar los probadores los criterios fueron: 1) la variación fenotípica y genotípica de los mestizos (línea \times probador); 2) la clasificación de las ocho líneas de ACG conocida, con cada uno de los tres probadores; 3) el coeficiente de divergencia (CD); 4) el efecto del probador, el efecto y la varianza de interacción línea \times probador. La variable estudiada fue el rendimiento promedio de mazorca por planta. Con base en los criterios señalados, el mejor probador fue la línea de baja ACG en comparación con la línea de alta ACG y la variedad original; además, la variedad original fue también un buen probador, pero con menor valor discriminatorio que la línea de baja ACG.

Palabras clave: *Zea mays* L., ACG, líneas de alta y baja ACG, mestizos, probadores.

ABSTRACT

In a maize (*Zea mays* L.) breeding program by hybridization it is important to have a reliable and efficient tester for the general combining ability (GCA) of maize inbred lines. With the aim to contribute more experimental evidence relative to the identification of the best tester of GCA of maize inbred lines, in this study 50 S_1 lines derived from the Compuesto Universal original (original variety), plus four lines of high and four of low GCA derived from populations of Xolache and Mex. Gpo. 10 were used. The S_1 lines were crossed with three testers: a line of low GCA (P1), a line of high GCA (P2), and the original variety (P3). The hypothesis was that the line of low GCA is the best tester. The criteria to evaluate the testers were: 1) the phenotypic and genotypic variation of top crosses (line \times tester); 2) the classification of the eight lines of known GCA, with each of the three testers, 3) the coefficient of divergence (CD), 4) the effect of the tester, effect and variance of interaction line \times tester. The variable studied was the average yield of ear by plant. Based on the mentioned criteria, the best tester was the line of low GCA compared to the line of high GCA and the original variety; besides, the original variety was also a good tester, but with less discriminatory value than the low GCA line.

Key words: *Zea mays* L., GCA, high and low GCA lines, top crosses, testers.

INTRODUCTION

The practical aspect of maize (*Zea mays* L.) breeding by hybridization is based on the development of inbred lines and the evaluation of their general combining ability (GCA) and their specific combining ability (SCA) to obtain

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Octubre, 2008. Aprobado: Septiembre, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 44: 17-30. 2010.

INTRODUCCIÓN

El aspecto práctico del mejoramiento genético del maíz (*Zea mays* L.) por hibridación está basado en el desarrollo de líneas endogámicas y la evaluación de su aptitud combinatoria general (ACG) y específica (ACE) para obtener híbridos comerciales de alto rendimiento. Dado que el comportamiento de las líneas *per se* no provee una buena medida de su valor en combinaciones híbridas (Hallauer, 1990), el desarrollo de metodologías simples, rápidas y adecuadas para evaluar nuevas líneas ha sido un problema en la generación de híbridos con alto potencial productivo (Bernardo, 2001). El uso de la ACG y ACE como herramientas en el mejoramiento genético es muy común no sólo para rendimiento de grano sino para otros caracteres, como tolerancia a salinidad (Welcker *et al.*, 2005), producción de etanol (Lorenz *et al.*, 2009), tolerancia al frío (Rodríguez *et al.*, 2007), digestibilidad en maíz forrajero (Argillier *et al.*, 2000), cantidad y calidad de proteína (Bhatnagar *et al.*, 2004), así como contenido de los antioxidantes carotenoides y tocoferoles (Egesel *et al.*, 2003), entre otros caracteres menos convencionales. De hecho, los mejoradores necesitan más información acerca de cómo seleccionar probadores para identificar líneas en la formación de variedades sintéticas e híbridos (Narro *et al.*, 2003). Los estimadores de ACG y ACE ayudan a los mejoradores a visualizar estrategias de mejoramiento por hibridación y selección (Welcker *et al.*, 2005; de la Vega y Chapman, 2006).

De 1920 a 1930, el procedimiento clásico para evaluar la ACG de líneas autofecundadas de maíz incluía la prueba de las $n(n-1)/2$ cruzas posibles de un grupo de n líneas, procedimiento impráctico cuando n es grande. Esta dificultad operativa condujo a la introducción y adopción generalizada de la prueba de mestizos propuesta por Davis (1927), en la cual se evalúan las cruzas de las líneas endogámicas con una variedad de polinización libre como probador de la ACG de las líneas.

Desde la adopción de la prueba de mestizos se ha estudiado la elección del mejor probador, pero no hay respuestas satisfactorias a todo el problema de fondo. La probabilidad de que el mejor probador sea una variedad de polinización libre de bajo rendimiento, una línea homocigótica recesiva o en general una población con baja frecuencia de loci importantes,

commercial hybrids of high-yielding. Since the *per se* performance of lines do not provide a good measure of their value in hybrid combinations (Hallauer, 1990), the development of simple, rapid and appropriate methodologies to evaluate new lines has been a problem in the generation of high-productive potential hybrids (Bernardo, 2001). The GCA and SCA utilization as tools for genetic improvement is still very common not only for grain yield, but for other traits such as tolerance to salinity (Welcker *et al.*, 2005), ethanol production (Lorenz *et al.*, 2009), cold tolerance (Rodríguez *et al.*, 2007), fodder maize digestibility (Argillier *et al.*, 2000), protein quality and quantity (Bhatnagar *et al.*, 2004), as well as content of antioxidants such as carotenoids and tocopherols (Egesel *et al.*, 2003), among other less conventional traits. In fact, breeders need more information on selecting testers to identify lines for the formation of synthetic varieties and hybrids (Narro *et al.*, 2003). GCA and SCA estimators assist breeders to visualize breeding strategies by hybridization and selection (Welcker *et al.*, 2005; de la Vega and Chapman, 2006).

From 1920 to 1930, the classic procedure to evaluate GCA of maize inbred lines included the test of the $n(n-1)/2$ possible crosses of a group of n lines, impractical procedure when n is large. This operational difficulty led to the introduction and widespread adoption of the top cross test proposed by Davis (1927), which was to evaluate the crosses of inbred lines with an open pollinated as tester of the GCA of lines.

Since the adoption of the top cross test, the election of the best tester has been studied, but there are not satisfactory answers to the entire underlying problem. The probability that the best tester is an open pollinated variety of low yield, an homozygotic recessive line, or in general, a population with low frequency of major loci, has received practical and theoretical importance since proposed by Davies (1934) and Hull (1945). According to Allison and Curnow (1966) and Marquez (1988), the best tester is the one that contains all the recessive genes for the trait of interest. By using lines of high and low GCA and high and low yield varieties as testers, Rawlings and Thompson (1962) and Reyes and Molina (1982) found that the best tester is the variety of low yield. With the exception of the work of Molina and García (1996), the line of low GCA has not been specifically

ha recibido importancia práctica y teórica desde su proposición por Davis (1934) y Hull (1945). Según Allison y Curnow (1966) y Márquez (1988), el mejor probador es el que contiene todos los genes recesivos para el carácter de interés. Al usar líneas de alta y baja ACG y variedades de alto y bajo rendimiento como probadores, Rawlings y Thompson (1962) y Reyes y Molina (1982) encontraron que el mejor probador es la variedad de bajo rendimiento. Con excepción del trabajo de Molina y García (1996), no se ha usado específicamente la línea de baja ACG como probador de líneas autofecundadas de maíz. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue determinar experimentalmente el mejor probador de la ACG para rendimiento de líneas autofecundadas de maíz, entre una línea de baja ACG, una línea de alta ACG y la variedad original.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron 50 líneas S_1 derivadas del compuesto varietal Compuesto Universal original (variedad original) y nueve líneas S_3 derivadas de los compuestos varietales Xolache y México Gpo. 10. De las nueve líneas S_3 , cuatro fueron de ACG alta (1A, 2A, 3A, 4A) y cinco de ACG baja (5B, 6B, 7B, 8B, 9B). Las líneas 2A y 9B, más la variedad original, fueron usadas como probadores de la ACG de las 50 líneas S_1 y de ocho de las nueve líneas de ACG conocida. Los mestizos resultantes de cada probador fueron: 1) del probador 1 (Línea 9B): 50 mestizos de líneas S_1 , más ocho mestizos de las líneas 1A a 8B; 2) del probador 2 (Línea 2A): 50 mestizos de líneas S_1 , más ocho mestizos de las líneas 1A a 9B, excepto la línea 2A; 3) del probador 3 (variedad original): 50 mestizos de líneas S_1 , más ocho mestizos de las líneas 1A a 8B. El Compuesto Universal original (variedad original) fue formado por cinco compuestos de mestizos de las mejores líneas del Programa de Maíz para Valles Altos del Centro de Investigaciones Agrícolas de la Mesa Central (CIAMEC) del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). Adicionalmente, intervinieron los compuestos de 7°, 6°, 6°, y 3^{er} ciclo de selección masal estratificada de las poblaciones México 208, Xolache, México Gpo. 10 e Hidalgo 8.

Tres experimentos fueron establecidos en un mismo lote de evaluación en los campos experimentales del Colegio de Postgraduados ubicados en Montecillo y Tecamac, estado de México, en la primavera del 2006. Montecillo tiene un clima templado con lluvias en verano y presencia de canícula, precipitación media anual de 655.6 mm, una temperatura media anual de 16.3 °C y una altitud de 2250 m. Tecamac tiene un clima seco con verano fresco y lluvioso, presencia de canícula,

used as tester of maize inbred lines. Therefore, the aim of this study was to determine experimentally the best tester of the GCA for yield of maize inbred lines, between a line of low GCA, a line of high GCA and the original variety.

MATERIALS AND METHODS

A total of 50 S_1 lines derived from the varietal composite Compuesto Universal original (original variety) and nine S_3 lines derived from the varietal composites Xolache and México Gpo.10 were used. Of the nine S_3 lines, four were of high GCA (1A, 2A, 3A, 4A) and five of low GCA (5B, 6B, 7B, 8B, 9B). The lines 2A and 9B, plus the original variety, were used as testers of the GCA of the 50 S_1 lines and eight of the nine lines of the known GCA. The top crosses resulting from each tester were: 1) from tester 1 (Line 9B): 50 top crosses of S_1 lines, plus eight top crosses of lines 1A to 8B; 2) from tester 2 (Line 2A): 50 top crosses of S_1 lines, plus eight top crosses of the lines 1A to 9B, except line 2A; 3) from tester 3 (original variety): 50 top crosses of S_1 lines, plus eight top crosses of the lines 1A to 8B. The Compuesto Universal original (original variety) was formed by five composites of top crosses of the best lines of the maize breeding program for High Valleys of the Centro de Investigaciones Agrícolas de la Mesa Central (CIAMEC) of the National Institute of Agricultural Research (INIA). Additionally, the composites of the 7th, 6th, 6th and 3rd cycle of stratified mass selection of the populations México 208, Xolache, México Gpo. 10 and Hidalgo 8 participated.

Three experiments were established in the same plot for evaluation in the experimental fields of the Colegio de Postgraduados located in Montecillo and Tecamac, state of México, during the 2006 spring season. Montecillo has a temperate climate with summer rains and presence of canicular days, average annual rainfall of 655.6 mm, an average annual temperature of 16.3 °C and an altitude of 2250 m. Tecamac has a dry climate with cool and rainy summer, presence of canicular days, average annual rainfall 563 mm, an average annual temperature of 15 °C and an altitude of 2298 m. In the first experiment the 58 top crosses of the tester 1 (P1) were evaluated, in the second the 58 top crosses of tester 2 (P2), and in the third the 58 top crosses of tester 3 (P3). In each experiment a randomized complete block design with 58 treatments (top crosses) and four replications was used. The experimental plot consisted of a six-meter long row with 16 holes of two plants each (32 plants per plot) with 80 cm spacing in between rows and 40 cm between plants (62 000 plants ha^{-1}).

The only evaluated variable was the ear yield per plant (RM) and the ears of all plants of the plot were harvested once they

precipitación media anual de 563 mm, temperatura media anual de 15 °C y una altitud de 2298 m. En el primer experimento se evaluaron los 58 mestizos del probador 1 (P1), en el segundo los 58 mestizos del probador 2 (P2), y en el tercero los 58 mestizos del probador 3 (P3). En cada experimento se usó un diseño de bloques completos al azar con 58 tratamientos (mestizos) y cuatro repeticiones. La parcela experimental tuvo un surco de 6 m de largo, con 16 matas de dos plantas cada una (32 plantas por parcela). La separación fue 80 cm entre surcos y 40 cm entre matas (62 000 plantas ha⁻¹).

La única variable evaluada fue el rendimiento de mazorca por planta (RM), y se cosecharon las mazorcas de todas las plantas de la parcela al alcanzar la humedad constante del grano. El peso de mazorca (g) se dividió entre el número de plantas de la parcela, para obtener el rendimiento promedio de mazorca por planta.

Los criterios para determinar el mejor probador de la ACG fueron:

- 1) El cuadrado medio de mestizos de cada probador y su correspondiente coeficiente de variación fenotípica (CVF) y genotípica (CVG): el mejor probador será el que presente la mayor variación entre sus mestizos (Hull, 1947).
- 2) La clasificación de las ocho líneas de ACG conocida: el mejor probador será el que ubique a las líneas de ACG conocida en su respectivo grupo de ACG, alta o baja, (Rawlings y Thompson, 1962).
- 3) El coeficiente de divergencia (CD): el mejor probador será el que presente el menor coeficiente de divergencia con respecto al orden previamente establecido de las líneas de ACG conocida (Reyes y Molina, 1982; Molina y García, 1996).
- 4) El efecto del probador y el de la interacción línea × probador: el mejor probador será el que presente el menor efecto genotípico y el menor efecto de interacción línea × probador con las líneas de ACG alta (Paz *et al.*, 1973; Márquez, 1988).

Para aplicar el primer criterio se realizó el análisis de varianza del rendimiento de los mestizos de cada probador en las dos localidades, para cuatro subconjuntos de mestizos: 1) los 58 mestizos; 2) los mestizos de las 50 líneas S₁; 3) los mestizos de 34 de las 50 líneas S₁ (las 17 líneas de más alta ACG y las 17 de más baja ACG en conjunto); 4) los mestizos de las ocho líneas de ACG conocida.

Debido a que la evaluación de campo de mestizos de cada probador se hizo en experimentos diferentes, pero en un mismo lote experimental, para que los cuadrados medios de mestizos de diferente probador pudieran ser debidamente comparados entre ellos, se calculó su correspondiente coeficiente de variación fenotípica (CVF) y genotípica (CVG) (Molina, 1992; Falconer y

reached the constant grain moisture. The ear weight (g) was divided among the number of plants of the plot to obtain the average ear yield per plant.

The criteria to determine the best tester of the GCA were:

- 1) The mean square of top crosses of each tester and its corresponding coefficient of phenotypic variation (CPV) and coefficient of genotypic variation (CGV): the best tester will be the one that present the greatest variation among its top crosses (Hull, 1947).
- 2) The classification of the eight lines of known GCA: the best tester will be the one that places the lines of known GCA in their respective group of GCA, high or low ability (Rawlings and Thompson, 1962).
- 3) The coefficient of divergence (CD): the best tester will be the one that shows the lowest coefficient of divergence with respect to the order previously established of lines of known GCA (Reyes and Molina, 1982; Molina and García, 1996).
- 4) The effect of the tester and of the line × tester interaction: the best tester will be the one that shows the lowest genotypic effect and the lowest of line × tester interaction with the lines of high GCA (Paz *et al.*, 1973; Márquez, 1988).

To apply the first criterion an analysis of variance was carried out for the top crosses yield of each tester in the two locations, for four subsets of top crosses: 1) the 58 top crosses; 2) the top crosses of the 50 S₁ lines; 3) the top crosses of 34 of the 50 S₁ lines (the 17 lines of higher GCA and 17 lines of lower GCA together); 4) the top crosses of the eight lines of known GCA.

Because the field evaluation of top crosses of each tester was carried out in different experiments, but in the same experimental plot, so the mean squares of top crosses of different tester could be properly compared with each other, their corresponding coefficient of phenotypic (CPV) and genotypic (CGV) variation were calculated (Molina, 1992; Falconer and Mackay, 1996). These coefficients allow comparing mean squares of top crosses evaluated in different experiments.

To classify the eight lines of known GCA (second criterion) the yield of the 58 top crosses of each tester was ordered from highest to lowest yield and the place that the top crosses of such lines occupied was registered. With this criterion it is expected that the best tester locates the top crosses of high GCA lines in the group of top crosses of higher yielding, and those of the lines of low GCA in the group of top crosses of lower yielding.

To apply the third criterion, for each tester the yield of the top crosses of the eight lines of known GCA was arranged from highest to lowest yield, as well as the top crosses yield of the total of the 58 lines (50 S₁ lines and eight lines of known GCA). The coefficient of divergence (CD) was calculated by the formula

Mackay, 1996). Estos coeficientes permiten comparar cuadrados medios de mestizos evaluados en diferentes experimentos.

Para clasificar las ocho líneas de ACG conocida (segundo criterio) se ordenó de mayor a menor el rendimiento de los 58 mestizos de cada probador y se registró el lugar que ocuparon los mestizos de tales líneas. Con este criterio se espera que el mejor probador ubique a los mestizos de líneas de ACG alta en el grupo de mestizos de mayor rendimiento, y a los de las líneas de ACG baja en el grupo de mestizos de menor rendimiento.

Para aplicar el tercer criterio, para cada probador se ordenó de mayor a menor el rendimiento de los mestizos de las ocho líneas de ACG conocida, así como el de los mestizos del total de las 58 líneas (50 líneas S₁ y ocho líneas de ACG conocida). El coeficiente de divergencia (CD) se calculó con la fórmula $CD = \left(\sum d_i^2 / n \right)^{1/2}$, donde d_i es la diferencia para la línea i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) entre el número de orden del mestizo del probador por comparar y el orden de la ACG de la línea; n es el número de líneas (Reyes y Molina, 1982). También se obtuvo el CD entre los tres pares posibles de ordenamientos de los 58 mestizos por probador. En este criterio, dos ordenamientos con coincidencia total tienen un CD igual a cero, y a mayor divergencia, mayor valor de CD. Así, el mejor probador será el del menor CD.

El cuarto criterio se basó en la estimación del valor y el efecto genotípico de cada probador, los efectos de interacción de las líneas con cada probador y de su respectiva varianza. Estas estimaciones se hicieron para las ocho líneas de ACG conocida y para las 58 líneas. Para tal fin se usó el modelo fenotípico $M_{ij} = L_i + P_j + (LP)_{ij}$, donde M_{ij} es el rendimiento promedio del mestizo de la línea i con el probador j , L_i es el valor genotípico de la línea i , P_j es el valor genotípico del probador j , y $(LP)_{ij}$ es el valor de la interacción de la línea i con el probador j (Molina, 1992; Falconer y Mackay, 1996). Según este criterio, el mejor probador será el que presente una menor varianza de la interacción línea × probador con las líneas de ACG alta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterio 1. Análisis de varianza, CPV y CGV

Los cuadrados medios y sus respectivos CVF y CGV de los grupos de mestizos por probador aparecen en el Cuadro 1. Con este criterio se esperaba que el cuadrado medio de los mestizos de la línea de baja ACG (P1) fuera mayor que el de los mestizos de la línea de alta ACG (P2) y que el de los mestizos de la variedad original (VO). Esto ocurrió así sólo cuando se consideraron en conjunto los cuatro mestizos de las líneas de alta y los cuatro de las de baja

$CD = \left(\sum d_i^2 / n \right)^{1/2}$, where d_i is the difference for line i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) between the order number of the top cross of the tester to compare and the order of the GCA of the line; n is the number of lines (Reyes and Molina, 1982). It was also obtained the CD among the three possible pairs of arrangements of the 58 top crosses by tester. In this criterion, two arrangements with total coincidence have a CD equal to zero, and to greatest divergence, the highest value of CD. Thus the best tester will be that of lowest CD.

The fourth criterion was based on the estimation of the genotypic value and effect of each tester, the effects of interaction of the lines with each tester and of their respective variance. These estimations were done for the eight lines of known GCA and for the 58 lines. For that purpose the phenotypic model $M_{ij} = L_i + P_j + (LP)_{ij}$, was used, where M_{ij} is the average yield of the top cross of the line i with the tester j , L_i is the genotypic value of the line i , P_j is the genotypic value of tester j , and $(LP)_{ij}$ is the value of the interaction of the line i with the tester j (Molina, 1992; Falconer and Mackay, 1996). According to this criterion, the best tester will be that one presenting a lower variance of the line × tester interaction with the lines of high GCA.

RESULTS AND DISCUSSION

Criterion 1. Analysis of variance, CPV y CGV

The mean squares and their respective CPV and CGV of the top crosses groups by tester are shown in Table 1. With this criterion it was expected that the mean squares of the top crosses of the line of low GCA (P1) were higher than that of the top crosses of the line of high GCA (P2) and that of the top crosses of the original variety (VO). This was so only when the four top crosses of the high GCA lines and the four of the low GCA lines were considered together (Table 1). Indeed, the mean square of the top crosses of P1 (1855.85) was much higher than the mean square of the top crosses of P2 (1194.05), though the top crosses of P3 had a mean square higher than both of them (2451.06); however, the interaction of top crosses × locations was also significantly higher with P3. In Table 1 it is also shown that the CPV of the top crosses of P1 were never lower than those of P2, but those of P3 were never lower than both; however, the highest value of CGV was for the top crosses of P1, followed by the top crosses of P3 and finally the top crosses of P2. These results indicate that when considering CPV and CGV only for the top crosses corresponding to the eight lines of contrasting known

Cuadro 1. Cuadrados medios y coeficientes de variación fenotípica y genotípica del análisis de varianza combinado para rendimiento de mazorca de mestizos.**Table 1. Mean squares and coefficients of phenotypic and genotypic variation of the combined analysis of variance for top crosses ear yield.**

FV	P1	P2	P3
Mestizos(58)	1000.42** 0.23 0.06	1480.95** 0.22 0.06	1225.23** 0.23 0.06
M de líneas S ₁ (50)	794.17** 0.20 0.05	913.39** 0.17 0.05	851.14** 0.19 0.05
M de 34 líneas [¶]	1624.33** 0.29 0.09	2496.06** 0.29 0.09	2018.60** 0.30 0.09
M de ocho líneas [†]	1855.85** 0.33 0.10	1194.05** 0.23 0.07	2451.06** 0.35 0.09
M ocho líneas×Loc	352.53	348.84	998.57**
M líneas de alta ACG×Loc	271.58	406.79	941.21*
M líneas de baja ACG×Loc	461.61	382.52	1388.04**

* (p≤0.05); ** (p≤0.01); hilera 1: cuadrado medio; hilera 2: coeficiente de variación fenotípica; hilera 3: coeficiente de variación genotípica; [¶] mestizos de ocho líneas de ACG conocida; [†] mestizos de las 17 líneas de más alta ACG y las 17 de más baja ACG; M: mestizos; P1: línea de baja ACG; P2: línea de alta ACG; y P3: variedad original \diamond * (p≤0.05); ** (p≤0.01); row 1: mean square; row 2: phenotypic coefficient of variation; row 3: genotypic coefficient of variation; [¶] top crosses from eight lines of known GCA; [†] top crosses from 17 lines of the highest GCA and the 17 lines of the lowest GCA; M: top crosses; P1: line of low GCA; P2: line of high GCA; P3: original variety.

ACG (Cuadro 1). En efecto, el cuadrado medio de los mestizos de P1 (1855.85) fue mucho mayor que el cuadrado medio de los mestizos de P2 (1194.05), aunque los mestizos de P3 tuvieron un cuadrado medio mayor que el de ambos (2451.06); sin embargo, la interacción de mestizos×localidades también fue significativamente mayor con P3. En el Cuadro 1 también se observa que los CVF de los mestizos de P1 nunca fueron menores que los de P2, pero los de P3 nunca fueron menores que ambos; sin embargo, el mayor valor de CVG fue para los mestizos de P1, seguido por los mestizos de P3 y finalmente los mestizos de P2. Estos resultados indican que cuando se considera el CVF y CVG sólo para los mestizos correspondientes a las ocho líneas de ACG conocida contrastante, el criterio de máxima variación entre mestizos sí funciona para discriminar entre probadores. Este resultado concuerda con lo señalado por Márquez (1988) en el sentido de que el probador de baja ACG debe producir una mayor varianza entre sus mestizos.

Para los 58 mestizos, los de las 50 líneas S₁ y los de las 34 líneas de más alta y baja ACG, el criterio de la magnitud del cuadrado medio no fue útil, ya que el cuadrado medio fue mayor en los mestizos de P2.

GCA, the criterion of maximum variation between top crosses does work to discriminate among testers. This result agrees with the point made by Márquez (1998) in the sense that the tester of low GCA should produce a greater variance among its top crosses.

For the 58 top crosses, those of the 50 S₁ lines and those of the 34 lines of highest and lowest GCA, the criterion of the magnitude of the mean square was not useful since the mean square was higher in the top crosses of P2. These results probably were due to the fact that the top crosses were in different experiments and that the S₁ lines were derived from a composite made up by lines of higher GCA of the CIAMEC program. For this reason, it is likely that all lines shared a large number of favorable genes for yield and therefore there was little variation between the GCA of such lines. In this regard, Hallauer and Miranda (1981) and Hallauer (1990) argue that the open-pollinated varieties improved by selection produce higher frequency of high GCA lines than their non- improved original varieties.

The greatest variation among the top crosses of P2 for the 58 top crosses, 50 top crosses of S₁ lines and 34 top crosses of high and low GCA (Table 1), relative to that of the top crosses corresponding of

Estos resultados probablemente se debieron a que los mestizos estuvieron en experimentos diferentes y a que las líneas S_1 se derivaron de un compuesto formado por las líneas de más alta ACG del programa del CIAMEC. Por esta razón, es probable que todas las líneas compartían un gran número de genes favorables para rendimiento por lo que hubo poca variación entre la ACG de las líneas. Al respecto, Hallauer y Miranda (1981) y Hallauer (1990) señalan que las variedades de polinización libre mejoradas por selección producen mayor frecuencia de líneas de alta ACG que sus variedades originales no mejoradas.

La mayor variación entre los mestizos de P2 para los 58 mestizos, 50 mestizos de líneas S_1 y 34 mestizos de más alta y baja ACG (Cuadro 1), con relación a la de los mestizos correspondientes de P1 y P3, pudo deberse a la alta aportación de genes favorables de la línea de alta ACG (P2) cuyos efectos se adicionaron a los efectos favorables de las líneas en diferentes combinaciones. Además, los efectos de interacción de líneas de baja ACG \times P2 fue positiva y la de mayor magnitud (Cuadro 5). El análisis de estos resultados indica que el criterio de máxima varianza entre mestizos no siempre es el criterio más adecuado para evaluar probadores, lo cual está en desacuerdo con lo encontrado por Reyes y Molina (1982) y Palacios y Ángeles (1990), en el sentido de que los probadores de bajo rendimiento (baja ACG) produjeron la mayor varianza entre sus mestizos. Respecto a sus CVF y CVG, se observa que en general las marcadas diferencias en los cuadrados medios de los 58 mestizos y los de su partición en tipos de mestizos disminuyeron drásticamente al ser comparados en términos de sus correspondientes coeficientes de variación entre probadores. Sólo en los mestizos de líneas S_1 , el CVF (0.20) de los mestizos de P1 fue ligeramente mayor que el de los mestizos de P2 y P3 (0.17 y 0.19). El análisis de este resultado indica que P1 es el mejor probador con base en el criterio de máxima variación entre mestizos, lo que coincide con Reyes y Molina (1982). En los CVG no hubo una tendencia clara y los valores para cada uno de los probadores tendieron a ser muy similares, por lo que no fue posible dilucidar sobre el mejor probador con este criterio. Esto sugiere que el criterio de máxima varianza entre mestizos funciona siempre que existan altas diferencias en la ACG de las líneas a evaluar.

De las interacciones de los mestizos de las ocho líneas de ACG conocida \times localidades (Cuadro 1), sólo

P1 and P3, may be due to the high contribution of favorable genes from the line of high GCA (P2) whose effects were added to the favorable effects of the lines in different combinations. Furthermore, the interaction effects of lines of low GCA \times P2 were positive and the ones of greatest magnitude (Table 5). The analysis of these results shows that the criterion of maximum variance among top crosses is not always the most appropriate criterion for evaluating testers, which is in disagreement with those found by Reyes and Molina (1982) and Palacios and Angeles (1990), in the sense that low yield testers (low GCA) produced the greatest variance among their top crosses. In regard to their CPV and CGV, it is observed in general, that the strong differences in the mean squares of the 58 top crosses and those of their partition in types of top crosses decreased dramatically when compared in terms of their corresponding coefficients of variation among testers. Only in the top crosses of S_1 lines, the CPV (0.20) of the top crosses of P1 was slightly higher than that of the top crosses of P2 and P3 (0.17 and 0.19). The analysis of this result indicates that P1 is the best tester based on the criterion of maximum variation between top crosses, which is consistent with Reyes and Molina (1982). In the CGVs there was not a clear trend and the values for each of the testers tended to be very similar, so it was not possible to elucidate on the best tester with this criterion. This suggests that the criterion of maximum variance between top crosses works as long as there are high differences in the GCA of the lines to evaluate.

Of the interactions of the top crosses from the eight lines of known GCA \times locations (Table 1), only that of the tester with broad genetic base (P3) was significant ($p \leq 0.05$). When the same set of lines was analyzed by strata (low and high GCA lines), the trend was the same; the interaction of the top crosses of P1 and P2 with locations was not significant, whereas the top crosses from both types of lines with P3 were highly significant ($p \leq 0.01$).

Criterion 2. Classification of lines of known GCA

In Table 2 it is shown the place that the eight lines of known GCA occupied in descending numerical order of the yield of top crosses, from the 58 lines with each tester. The tester that arranged best the

la del probador de amplia base genética (P3) fue significativa ($p \leq 0.05$). Cuando el mismo conjunto de líneas fue analizado por estratos (líneas de baja y alta ACG), la tendencia fue la misma; la interacción de los mestizos de P1 y P2 con localidades fue no significativa, mientras que los mestizos de ambos tipos de líneas con P3 fue altamente significativa ($p \leq 0.01$).

Criterio 2. Clasificación de líneas de ACG conocida

En el Cuadro 2 se presenta el lugar que ocuparon las ocho líneas de ACG conocida en el orden numérico descendente del rendimiento de los mestizos, de las 58 líneas con cada probador. El probador que ordenó mejor a las líneas tanto de alta como de baja ACG fue P1, ya que con este probador las líneas 1A, 2A y 3A de alta ACG ocuparon lugares bajos (8, 14 y 17), mientras que la línea 4A ocupó el lugar 46. Las líneas 5B, 6B, 7B y 8B de baja ACG ocuparon lugares numéricamente altos (55, 54, 57 y 53). Esto evidencia que el probador que mejor clasifica a las líneas de acuerdo con su verdadero valor genotípico es P1.

El probador de alta ACG (P2) ordenó de peor manera las líneas, pues colocó en los últimos lugares a las líneas de alta ACG. Así, por ejemplo, las líneas 1, 3 y 4 ocuparon los lugares 51, 44 y 57, mientras

Cuadro 2. Orden de clasificación de las líneas de ACG conocida en el orden de clasificación de los 58 mestizos del análisis combinado para cada tipo de probador para rendimiento de mazorca por planta.

Table 2. Classification order of known GCA lines in the classification order of the 58 top crosses of the combined analysis for each type of tester for ear yield per plant.

Líneas	P1	P2	P3
1(A)	8	51	29
2(A)	14	-	18
3(A)	17	44	10
4(A)	46	57	56
5(B)	55	53	52
6(B)	54	58	57
7(B)	57	32	48
8(B)	53	55	58
9(B)	-	56	-

P1: probador de baja ACG; P2: probador de alta ACG; P3: probador variedad original ♦ P1: tester of low GCA; P2: tester of high GCA; P3: tester original variety.

lines of both high and low GCA was P1, since with this tester the lines 1A, 2A, and 3A of high GCA occupied low places (8, 14, and 17), whereas line 4A occupied the place 46. Lines 5B, 6B, 7B, and 8B of low GCA occupied places numerically high (55, 54, 57, and 53). This demonstrates that the tester that best classifies the lines according to their true genotypic value is P1.

The high GCA tester (P2) ordered in the worst way the lines; it placed at the bottom the high GCA lines. For example, lines 1, 3, and 4 were ranked 51, 44, and 57, while the lines of low GCA were indeed relatively well classified. From the above, it follows that the tester of high GCA did not differentiate between lines of high and low GCA, which is why it is considered of high risk (Márquez, 1988).

The P3 (original variety) was second in accuracy to classify both high and low GCA lines, reason why it is a good tester of GCA as well as being the safest tester (Allison and Curnow, 1966; Márquez, 1988), it is also a tester of broad genetic base (Mendoza *et al.*, 2000). These results are consistent with those obtained by Palacios and Angeles (1990) who studied testers of high and low yield of broad and reduced genetic base, and they found that the best tester was the variety of broad genetic base akin to lines under evaluation.

Criterion 3. Coefficient of divergence

In Table 3 it is shown the coefficients of divergence (CD) of seven of the known GCA lines together and by strata, comparing the arrangement given for each tester with the order previously known based on its value of GCA. Lines 2A and 9B were excluded since they served as testers. For the seven lines together the lower CD (1.41) corresponded to P1. The higher CD was 2.56, corresponding to P2, while P3 had a CD with an intermediate value (1.51) between the high and low GCA tester. This indicates that the best tester is P1, since the lowest the CD the best coincidence between the original classification of the lines and the classification made by a tester; the minimum value of the CD is zero and denotes the perfect coincidence between the two classifications. These results agree with those obtained by Molina and Garcia (1996) who in making diallel crosses with these same eight lines found that the lowest CD were obtained by using as testers the lines with low GCA.

que las líneas de baja ACG sí estuvieron relativamente bien clasificadas. De lo anterior se deduce que el probador de alta ACG no diferenció entre las líneas de alta y baja ACG, razón por lo cual se le considera de alto riesgo (Márquez, 1988).

El P3 (variedad original) ocupó el segundo lugar en precisión para clasificar las líneas tanto de alta como de baja ACG, por lo cual es un buen probador de la ACG pues además de ser el probador más seguro (Allison y Curnow, 1966; Márquez, 1988), también es un probador de amplia base genética (Mendoza *et al.*, 2000). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Palacios y Ángeles (1990), quienes al estudiar probadores de alto y bajo rendimiento de amplia y reducida base genética, encontraron que el mejor probador fue la variedad de amplia base genética emparentada con las líneas bajo evaluación.

Criterio 3. Coeficiente de divergencia

En el Cuadro 3 se presentan los coeficientes de divergencia (CD) de siete de las líneas de ACG conocida en conjunto y por estratos, comparando el orden dado por cada probador con el orden previamente conocido con base en su valor de ACG. Las líneas 2A y 9B fueron excluidas ya que fungieron como probadores. Para las siete líneas en conjunto el CD menor (1.41) correspondió a P1. El mayor CD fue 2.56, correspondiente a P2, mientras que P3 tuvo un CD con un valor intermedio (1.51) entre el de baja y alta ACG. Esto indica que el mejor probador es P1, ya que mientras menor sea el CD mayor coincidencia existe entre la clasificación original de las líneas y la clasificación hecha por un probador; el valor mínimo del CD es cero y denota la coincidencia perfecta entre una y otra clasificación. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Molina y García (1996) quienes al realizar un dialélico con estas mismas ocho

Based on this criterion, the original variety should be the second best tester.

Regarding the CD by strata for the same seven lines, it is observed (Table 3) that in the stratum of lines of high GCA, the CD had a zero value with P1, 1.41 with P3 and 2.08 with P2. In the stratum of lines of low GCA, the value of the CD was 1.87 with P1, 1.58 with P3 and 2.87 with P2. This result is very important since it indicates that the line of low GCA (P1) is a highly efficient tester to detect lines of high GCA which are required to be identified in a breeding program by hybridization; however, it is regular to detect lines of low GCA along with P3 since both of them had very similar CD in the stratum of lines of low GCA (1.87 and 1.58).

When comparing the order of classification of the three testers considering the 57 lines (Table 3), it was found that the comparison P1P3 had the lowest CD (2.06) followed by P2P3 (2.18) and P1P2 (2.37). Then, P1 and P3 classify the lines in a similar way than what was undertaken with P1 and P2.

Criterion 4. Effect of testers and the interaction line \times tester

Effect of testers

In regard to the value and the genotypic effect of the three testers (Table 4), it was found that P1 had the lowest genotypic value and effect both on average of the seven lines as on the strata of lines of high and low GCA. The second higher value was for P3 and the highest value was for P2. Thus, it was inferred that P1 is the best tester for being the one that has less influence on the yield of its top crosses and allows the lines to express its effect. By contrast, P2 having the highest effect it best masks the effect of the lines. The tester 3 has an intermediate effect

Cuadro 3. Coeficientes de divergencia de siete líneas de ACG conocida y de 57 líneas en conjunto, para rendimiento.
Table 3. Coefficients of divergence of seven known GCA lines and of 57 lines as a whole for yield.

Estrato	P1	P2	P3
Total (siete líneas)	1.41	2.56	1.51
3 líneas de alta ACG	0.00	2.08	1.41
4 líneas de baja ACG	1.87	2.87	1.58
57 líneas [†]	P1P2=2.37	P1P3=2.06	P2P3=2.18

P1: probador de baja ACG; P2: probador de alta ACG; P3: probador variedad original. [†] Incluye 50 líneas S₁ más 7 líneas de ACG conocida. P1: tester of low GCA; P2: tester of high GCA; P3: tester original variety. 50 S₁ lines plus 7 lines of known GCA are included.

líneas encontraron que los menores CD se obtuvieron usando como probadores las líneas de baja ACG. Con base en este criterio, la variedad original sería el segundo mejor probador.

Respecto a los CD por estratos para las mismas siete líneas, se observa (Cuadro 3) que en el estrato de líneas de alta ACG, el CD tuvo un valor cero con P1, 1.41 con P3 y 2.08 con P2. En el estrato de líneas de baja ACG, el valor del CD fue 1.87 con P1, 1.58 con P3 y 2.87 con P2. Este resultado es muy importante ya que indica que la línea de baja ACG (P1) es un probador altamente eficiente para detectar líneas de alta ACG, las cuales se deben identificar en un programa de mejoramiento genético por hibridación; sin embargo, es regular para detectar líneas de baja ACG junto con P3 ya que ambos tuvieron CD muy similares en el estrato de líneas de baja ACG (1.87 y 1.58).

Cuando se compararon los órdenes de clasificación de los tres probadores considerando las 57 líneas (Cuadro 3), se encontró que la comparación P1P3 tuvo el menor CD (2.06), le siguió P2P3 (2.18) y P1P2 (2.37). Entonces, P1 y P3 clasifican a las líneas de manera más parecida que lo efectuado con P1 y P2.

Criterio 4. Efecto de probadores y de la interacción línea×probador

Efecto de probadores

Respecto al valor y al efecto genotípico de los tres probadores (Cuadro 4), se encontró que P1 tuvo el menor valor y efecto genotípicos tanto en promedio de las siete líneas como en los estratos de líneas de alta y baja ACG. El segundo valor más alto lo tuvo P3 y el más alto P2. Así, se infiere que P1 es mejor probador por ser el que menos influye en el rendimiento de sus mestizos y permite que las líneas manifiesten su efecto. Por el contrario, el P2 al tener el mayor efecto enmascara más el efecto de las líneas. El probador 3 tiene un efecto intermedio entre P1 y P2 y es un probador inferior a P1, pero mejor que P2. Al respecto, Hull (1947) señala que las líneas endogámicas de mayor rendimiento usadas comercialmente en la formación de híbridos son poco fuertes como probadores, ya que enmascaran los efectos de los alelos favorables en las líneas que se desea evaluar, lo que las hace inefectivas como probadores de la ACG.

between P1 and P2 and it is a lower tester to P1, but better than P2. In this regard, Hull (1947) notes that higher yielding inbred lines used commercially in the formation of hybrids are not strong as testers, because they mask the effects of favorable alleles in the lines to be evaluated, making them ineffective as testers of the GCA.

With regard to the values and effects of the tester for the 57 lines (Table 4), it was found that P1 had the lowest value and effect for both the 57 lines as a whole and for the three strata.

Effect of interaction line×tester

Values and effects of line×tester interaction are shown in Table 5. In the interaction effects it was observed that in lines of known GCA, P1 and P3 interact positively with the lines of high GCA and negatively with lines of low GCA, while the opposite occurred with P2. In the group of 57 lines, the three testers interact positively with high GCA lines and negatively with low GCA lines. Reyes and Molina (1982) also report that high GCA lines interact more with low yield testers than with high yield testers. The positive interaction of high GCA with low GCA lines or with low yielding varieties, seems to be the rule with all kind of studies like this; this interaction when positive acts as a masking factor of the positive effect of the high GCA lines in the top cross reason why an interaction equal or close to zero would be the most favorable.

Variance of the line×tester interaction

The variance of the line×tester interaction by strata of the known GCA lines and of the 57 lines (50 S₁ lines plus seven lines of known GCA) is presented in Table 6. In the known GCA lines, both in the group of high and low GCA, tester 3 presented the lower variance (30.70 and 41.33). However, when comparing the variances of the testers P1 and P2, it was found that in the stratum of high GCA lines, the tester of high GCA showed higher variance (95.92) than the tester of low GCA (69.36) which coincides with that obtained by Keller (1949), who in studying the components of variance in 22 experiments for yield with testers of high and low GCA found that in 13 of them

Cuadro 4. Valores y efectos genotípicos de probadores por estratos para las siete líneas de ACG conocida y para 57 líneas en conjunto.**Table 4. Genotypic values and effects of testers by strata for the seven known GCA lines and for 57 lines as a whole.**

Estrato	P1		P2		P3	
	Valor	Efecto	Valor	Efecto	Valor	Efecto
Para las líneas de ACG conocida						
Alta ACG	143.37	3.98	152.75	13.36	148.12	8.73
Baja ACG	118.71	-20.67	150.72	11.33	129.18	-10.20
Siete líneas	129.28	-10.10	151.58	12.19	137.30	-2.08
Para las 57 líneas						
19 de alta	151.40	-3.04	184.98	30.54	164.33	9.89
19 de intermedia	141.31	-13.12	172.09	17.65	153.55	-0.89
19 de baja	126.85	-27.59	157.48	3.03	137.99	-16.45
57 líneas [†]	139.85	-14.59	171.51	17.07	151.96	-2.48

P1: probador de baja ACG; P2: probador de alta ACG; P3: probador variedad original. [†] Incluye 50 líneas S₁ más 7 líneas de ACG conocida ♦ P1: tester of low GCA; P2: tester of high GCA; P3: tester original variety. 50 S₁ lines plus 7 lines of known GCA are included.

Respecto a los valores y efectos de probador para las 57 líneas (Cuadro 4), puede observarse que P1 tuvo el menor valor y efecto tanto para las 57 líneas en conjunto como para los tres estratos.

Efecto de interacción línea×probador

Los valores y efectos de interacción línea×probador se muestran en el Cuadro 5. En los efectos de interacción se observa en las líneas de ACG conocida que P1 y P3 interaccionan positivamente con las líneas de alta ACG y negativamente con las líneas de baja ACG, mientras que con P2 ocurrió lo

the component of variance line×tester was higher when lines of high GCA were used as testers. Paz *et al.* (1973) also found that the component of variance lines of high GCA×selected testers (high yield) was higher than the component of variance lines of high GCA×non-selected testers (low yield). The opposite happened in the stratum of low GCA lines, where the highest variance was that of the low GCA tester (P1) with 119.71 against 96.23 of the high GCA tester (P2), which coincides with what was found by Hull (1945, 1952), who notes that this component should be higher for testers that are low GCA lines.

Cuadro 5. Valores y efectos promedio de interacción línea×probador por estratos de las líneas de ACG conocida y de las 57 líneas en conjunto.**Table 5. Average values and effects of the line×tester interaction by strata of the known GCA lines and of the 57 lines as a whole.**

Estrato	P1		P2		P3	
	Valor	Efecto	Valor	Efecto	Valor	Efecto
Para las líneas de ACG conocida						
3 ACG alta	144.70	5.40	131.77	-7.53	141.43	2.13
4 ACG baja	135.25	-4.05	144.95	5.65	137.70	-1.60
Para las 57 líneas [†]						
19 de alta	158.89	4.45	160.04	5.60	159.41	4.97
19 de intermedia	152.75	-1.69	154.68	0.24	153.50	-0.94
19 de baja	151.68	-2.76	148.59	-5.84	150.41	-4.03

P1: probador de baja ACG; P2: probador de alta ACG; P3: probador variedad original. [†] Incluye 50 líneas S₁ más 7 líneas de ACG conocida ♦ P1: tester of low GCA; P2: tester of high GCA; P3: tester original variety. 50 S₁ lines plus 7 lines of known GCA are included.

contrario. En el grupo de 57 líneas, los tres probadores interaccionaron positivamente con las líneas de alta ACG y negativamente con las líneas de baja ACG. Reyes y Molina (1982) también reportan que las líneas de alta ACG interaccionan más con probadores de bajo rendimiento que con los probadores de alto rendimiento. La interacción positiva de líneas de alta ACG con líneas de baja ACG o con variedades de bajo rendimiento, parece ser la regla en todo tipo de estudios como el presente; esta interacción al ser positiva, actúa como un factor enmascarador del efecto positivo de las líneas de alta ACG en el mestizo, por lo que de hecho una interacción igual o cercana a cero sería lo más favorable.

Varianza de la interacción línea×probador

En el Cuadro 6 se presenta la varianza de la interacción línea×probador por estratos de las líneas de ACG conocida y de las 57 líneas (50 líneas S_1 más siete líneas de ACG conocida). En las líneas de ACG conocida, tanto en el grupo de líneas de alta como en el de baja ACG, el probador 3 presentó la menor varianza (30.70 y 41.33). Sin embargo, al comparar las varianzas de los probadores P1 y P2, se encontró que en el estrato de líneas de alta ACG, el probador de alta ACG presentó mayor varianza (95.92) que el probador de baja ACG (69.36) lo cual coincide con lo obtenido por Keller (1949), quien al estudiar los componentes de varianza en 22 experimentos para rendimiento con probadores de alta y baja ACG, encontró que en 13 de ellos el componente de varianza línea×probador fue más grande cuando se usaron

In the group of 57 lines, it was observed that in the stratum of high GCA lines, the variance of interaction of high GCA lines \times P1 was lower than in high GCA lines \times P2. This tendency also occurred for the case of lines of high known GCA.

The value and effect of the interaction of lines of high GCA \times P1 (Table 5) was higher than the interaction of lines of high GCA \times P2; the opposite occurs with their respective variances (Table 6). Thus, although there are values and effects of interaction higher in P1, the variability of these is much lower than those of P2, so that the classification of high GCA lines is not affected because the interaction effect tends to be constant. That is convenient because having a lower variance of interaction of high GCA \times P1 allows that the value of top cross reflects the value or effect of the lines. For the values and effects of interaction of the 57 lines (Table 5), the interaction of lines of high GCA \times P1 was similar to the interaction of lines of high GCA \times P2; however, for their respective variances (Table 6) the tendency was the same as for the known GCA lines, because the variance of the interaction lines of high GCA \times P1 was lower than that of the lines of high GCA \times P2.

Results of the four criteria application used in this study to decide on the best tester, contribute experimental evidence that the low GCA line (P1) is the best tester of the GCA of maize inbred lines. Such evidence agrees with the theoretical studies of Hull (1945), Allison and Curnow (1966), Márquez (1988) and the experimental work done by Molina and García (1996). The use of low GCA lines as testers will allow in an efficient way to identify high

Cuadro 6. Varianza de la interacción línea×probador por estratos en las líneas de ACG conocida y en las 57 líneas.
Table 6. Variance of the line×tester interaction by strata in the known GCA lines and the 57 lines.

Líneas	P1	P2	P3
Para las líneas de ACG conocida			
3 ACG alta	69.36	95.92	30.70
4 ACG baja	119.71	96.23	41.33
7 líneas	82.97	80.09	30.90
Para las 57 líneas			
19 ACG alta	57.98	72.26	53.45
19 ACG intermedia	39.77	28.50	29.46
19 ACG baja	68.19	88.48	50.13
57 líneas [†]	53.34	60.82	42.77

P1: probador de baja ACG; P2: probador de alta ACG; P3: probador variedad original. [†] Incluye 50 líneas S_1 más 7 líneas de ACG conocida. ♦ P1: tester of low GCA; P2: tester of high GCA; P3: tester original variety. 50 S_1 lines plus 7 lines of known GCA are included.

como probadores líneas de alta ACG. Paz *et al.* (1973) encontraron también que el componente de varianza líneas de alta ACG \times probadores seleccionados (alto rendimiento) fue mayor que el componente de varianza líneas de alta ACG \times probadores no seleccionados (bajo rendimiento). Lo contrario sucedió en el estrato de líneas de baja ACG, donde la mayor varianza fue la del probador de baja ACG (P1) con 119.71 contra 96.23 del probador de alta ACG (P2), lo que coincide con lo encontrado por Hull (1945, 1952), quien señala que dicho componente debe ser mayor para probadores que son líneas de baja ACG.

En el grupo de 57 líneas se observa que en el estrato de líneas de alta ACG, la varianza de la interacción líneas de alta ACG \times P1 fue menor que en líneas de alta ACG \times P2. Esta tendencia también ocurrió para el caso de las líneas de alta ACG conocida.

El valor y efecto de la interacción de líneas de alta ACG \times P1 (Cuadro 5) fue mayor que la interacción de líneas de alta ACG \times P2; lo contrario ocurre con sus respectivas varianzas (Cuadro 6). Así, aunque hay valores y efectos de interacción mayores en P1, la variabilidad de éstos es mucho menor que aquellos de P2, por lo que no se afecta la clasificación de líneas de alta ACG porque el efecto de interacción tiende a ser constante. Eso es conveniente porque tener una menor varianza de interacción líneas de alta ACG \times P1, permite que el valor del mestizo refleje el valor o efecto de las líneas. Para los valores y efectos de interacción de las 57 líneas (Cuadro 5), la interacción de líneas de alta ACG \times P1 fue similar a la interacción de líneas de alta ACG \times P2; sin embargo, para sus respectivas varianzas (Cuadro 6) la tendencia fue la misma que para las líneas de ACG conocida, pues la varianza de la interacción líneas de alta ACG \times P1 fue menor que la de líneas de alta ACG \times P2.

Los resultados de la aplicación de los cuatro criterios usados en el presente estudio para decidir sobre el mejor probador aportan evidencia experimental de que la línea de baja ACG (P1) es el mejor probador de la ACG de líneas autofecundadas de maíz. Dicha evidencia concuerda con los trabajos teóricos de Hull (1945), Allison y Curnow (1966), Márquez (1988) y el trabajo experimental realizado por Molina y García (1996). El uso de líneas de baja ACG como probadores permitirá de manera eficiente identificar líneas de alta ACG susceptibles de usarse en la formación de híbridos y variedades sintéticas con alto potencial productivo.

GCA lines susceptible to be used in the formation of hybrids and synthetic varieties with high yield potential.

CONCLUSIONS

The analysis of the results of the application of the four criteria to evaluate testers suggests that the low GCA line was the best tester of the general combining ability of maize inbred lines. However, the original variety was also a good tester, but with less discriminatory value than the low GCA line. The criterion based on the principle that the best tester is one whose top crosses have mean square and coefficients of phenotypic and genotypic variations that are the maximums is true, provided that there is a wide difference among the GCA of the lines under test. The lowest coefficient of divergence was obtained when the low GCA line was used as tester for top crosses of the known GCA lines.

The low GCA line had the lesser genotypic effect, both in the top crosses of known GCA lines and in the total of the 58 top crosses. The low GCA line, with respect to the high GCA line had the lowest variance of line \times tester interaction, although with the known high GCA lines had the highest effect in relation to the high GCA line.

—End of the English version—



CONCLUSIONES

El análisis de los resultados de la aplicación de los cuatro criterios para evaluar probadores sugiere que la línea de baja ACG fue el mejor probador de la aptitud combinatoria general de líneas autofecundadas de maíz. No obstante, la variedad original fue también un buen probador, pero con menor valor discriminatorio que la línea de baja ACG. El criterio basado en el principio de que el mejor probador es aquel cuyos mestizos tienen cuadrado medio y coeficientes de variación fenotípica y genotípica que son los máximos es cierto, siempre que exista amplia diferencia entre la ACG de las líneas en prueba. El menor coeficiente de divergencia se tuvo con la línea de baja ACG como probador para los mestizos de las líneas de ACG conocida.

La línea de baja ACG tuvo el menor efecto genotípico, tanto en los mestizos de líneas de ACG conocida como en el total de los 58 mestizos. La línea de baja ACG, con respecto a la línea de alta ACG, tuvo la menor varianza de interacción línea \times probador, aunque con las líneas de alta ACG conocida tuvo el mayor efecto en relación con la línea de alta ACG.

LITERATURA CITADA

Allison, J. C. S., and R. N. Curnow. 1966. On the choice of tester parent for the breeding of synthetic varieties of maize (*Zea mays* L.). *Crop Sci.* 6: 541-544.

Argillier, O., V. Méchin, and Y. Barrière. 2000. Inbred line evaluation and breeding for digestibility-related traits in forage maize. *Crop Sci.* 40: 1596-1600.

Bernardo, R. 2001. Breeding potential of intra-and interheterotic group crosses in maize. *Crop Sci.* 41: 68-71.

Bhatnagar, S., F. J. Betrán, and L. W. Rooney. 2004. Combining abilities of quality protein maize inbreds. *Crop Sci.* 44: 1997-2005.

Davis, R. L. 1927. Report of the plant breeder. Puerto Rico. Agr. Exp. Sta. Ann. pp: 14-15.

Davis, R. L. 1934. Maize crossing values in second generation lines. *J. Agr. Res.* 48: 339-357.

De la Vega, A. J., and S. C. Chapman. 2006. Multivariate analyses to display interactions between environment and general or specific combining ability in hybrid crops. *Crop Sci.* 46: 957-967.

Egesel, C. O., J. C. Wong, R. J. Lambert, and T. R. Rocheford. 2003. Combining ability of maize inbreds for carotenoids and tocopherols. *Crop Sci.* 43: 818-823.

Falconer, D. S., and T. F. C. Mackay. 1996. Introduction to Quantitative Genetics. Fourth Edition. Ed. Longman. 464 p.

Hallauer, A. R. 1990. Methods used in developing maize inbreds. *Maydica* 35: 1-16.

Hallauer, A. R., and J. B. Miranda. 1981. Quantitative Genetics in Maize Breeding. 2nd ed. Iowa State Univ. Press. Ames, IA. 468 p.

Hull, F. H. 1945. Recurrent selection and specific combining ability in corn. *J. Am. Soc. Agron.* 37: 134-145.

Hull, F. H. 1947. Cryptic homozygous lines. *J. Am. Soc. Agron.* 39: 438-439.

Hull, F. H. 1952. Recurrent selection and overdominance. In: Gowen, J. W. (ed). Heterosis. Iowa State Univ. Press, Ames IA. pp: 451-473.

Keller, R. R. 1949. A comparison involving the number of, and relationship between testers in evaluating inbred lines of maize. *Agron. J.* 49: 323-331.

Lorenz, A. J., J. G. Coors, N. de Leon, E. J. Wolfrum, B. R. Hames, A. D. Sluiter, and P. J. Weimer. 2009. Characterization, genetic variation, and combining ability of maize traits relevant to the production of cellulosic ethanol. *Crop Sci.* 49: 85-98.

Márquez S., F. 1988. Genotecnia Vegetal. Métodos, Teoría y Resultados. Tomo II. AGT editor S. A., México, D. F. 756 p.

Mendoza E., M., A. Oyervides G., y S. A. Rodríguez H. 2000. Efecto de dos probadores en la selección de líneas de maíz tropical. *Rev. Fitotec. Mex.* 23: 79-86.

Molina G., J. D. 1992. Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa. AGT editor S. A., México, D. F. 349 p.

Molina G., J. D., J. J. García Z. 1996. Uso de líneas de alta y baja aptitud combinatoria general (ACG) como probadores de la ACG de líneas autofecundadas de maíz. In: Memoria del XVI Congreso Nacional de Fitogenética. Montecillo, Edo. de México. pp: 230.

Narro, L., S. Pandey, J. Crossa, C. De Leon, and F. Salazar. 2003. Using line X tester interaction for the formation of yellow maize synthetics tolerant to acid soils. *Crop Sci.* 43: 1718-1728.

Palacios, V. O., y H. H. Ángeles A. 1990. Comparación de probadores para evaluar líneas S_1 de maíz. *Agrociencia* 1: 123-141.

Paz J., R., J. D. Molina G., y L. Bucio A. 1973. Variedades de bajo rendimiento contra variedades de alto rendimiento como probadores para medir la aptitud combinatoria general en líneas autofecundadas de maíz. *Agrociencia* 11: 43-55.

Rawlings, J. O., and D. L. Thompson. 1962. Performance level as criterion for the choice of maize testers. *Crop Sci.* 2: 217-220.

Reyes M., C. A., y J. D. Molina G. 1982. Probadores de alto y bajo rendimiento para aptitud combinatoria general de líneas autofecundadas de maíz. *Agrociencia* 47: 117-130.

Rodríguez, V.M., A. Butrón, G. Sandoya, A. Ordás, and P. Revilla. 2007. Combining maize base germplasm for cold tolerance breeding. *Crop Sci.* 47: 1467-1474.

Welcker, C., C. The, B. Andreau, C. de Leon, S. N. Parentoni, J. Bernal, J. Felicite, C. Zonkeng, F. Salazar, L. Narro, A. Charcosset, and W. J. Horst. 2005. Heterosis and combining ability for maize adaptation to tropical acid soils: implications for future breeding strategies. *Crop Sci.* 45: 2405-2413.