

HETEROSIS EN MAÍZ DEL ALTIPLANO DE MÉXICO CON DIFERENTE GRADO DE DIVERGENCIA GENÉTICA*

HETEROSIS IN MAIZE FROM THE MEXICAN HIGHLANDS WITH DIFFERENT DEGREE OF GENETIC DIVERGENCE

Gilberto Esquivel Esquivel^{1§}, Fernando Castillo González², Juan Manuel Hernández Casillas¹, Amalio Santacruz Varela², Gabino García de los Santos², Jorge A. Acosta Gallegos³ y Antonio Ramírez Hernández²

¹Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Carretera Los Reyes-Textcoco, km 13.5. Coatlinchán, Textcoco, Estado de México. C. P. 56250. Tel. 01 595 9212657, 9212715 y 9212721. (hernandez.juan@inifap.gob.mx). ²Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Textcoco, km 36.5. Montecillo, Textcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel. 01 595 9520200. Ext. 1535. (fcastill@colpos.mx), (asvarela@colpos.mx), (garciag@colpos.mx). ³Campo Experimental Bajío. INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende, km 6.5. Celaya, Guanajuato, México. Tel. 01 461 153 23. Ext. 112. (acosta.jorge@inifap.gob.mx).

[§]Autor para correspondencia: esgil568@hotmail.com.

RESUMEN

Con el objetivo de valorar la variación de la heterosis, y de identificar posibles patrones heteróticos en maíz (*Zea mays* L.), se evaluaron 15 poblaciones progenitoras originarias del área de distribución geográfica de la raza Chalqueño y sus 105 cruzamientos, más otros grupos de genotipos adicionales, todos provenientes de Valles Altos de México. La evaluación se hizo en el ciclo agrícola primavera-verano 2006 en Zotoluca, Apan y Mixquiahuala en el estado de Hidalgo y Textcoco en el Estado de México, bajo un diseño látice 12*12 con tres repeticiones. Se registró el rendimiento de grano, índice de grano, mazorcas por planta, diámetro de mazorca, longitud de grano, número de hileras por mazorca, días a floración masculina y altura de planta. Hubo diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre localidades, entre grupos y entre poblaciones dentro de grupos para las ocho variables. Se detectó correlación significativa entre el rendimiento y sus componentes y altura de planta. Las poblaciones Col-03-64, Col-6784 y F_{HC}H-129F_n de la raza Chalqueño presentaron comportamiento *per se* alto, al igual que el promedio de sus cruas, mientras que Gto-142, Zac-66, Tlax-151 y VS-22, variantes de la misma raza, presentaron la mayor

ABSTRACT

With the aim of assess the variation of heterosis, and to identify potential heterotic patterns in maize (*Zea mays* L.), 15 progenitor populations originating from the geographical area of distribution of the Chalqueño race, along with their 105 crosses and other additional groups of genotypes all of them from the Mexican Highlands were evaluated. The evaluation was carried out during the 2006 Spring-Summer agricultural cycle in Zotoluca, Apan, Hidalgo, Mixquiahuala, Hidalgo and Textcoco, State of Mexico, under a 12*12 lattice design with three replications. Grain yield, grain index, corncobs per plant, corncob diameter, kernel length, number of kernel rows per corncobs; days to anthesis and plant height were registered. Significant differences ($p \leq 0.01$) among locations, among groups and among populations within groups were detected for the eight traits. Significant correlation was found between yield and its components and between yield and plant height. Populations Col-03-64, Col-6784 and F_{HC}H-129F_n of the Chalqueño race showed high *per se* performance, as did their crosses as an average, while Gto-142, Zac-66, Tlaxcala-151 and VS-22,

* Recibido: septiembre de 2010
Aceptado: abril 2011

expresión tanto en el rendimiento y sus componentes como en morfología y fenología. Hubo interacciones importantes entre las poblaciones progenitoras y patrones heteróticos sobresalientes, destacando varias combinaciones en las que participaron Oax-814 y Zac-66, siendo determinante el origen geográfico distante asociado con mayor divergencia genética.

Palabras clave: *Zea mays* L., cruzas dialélicas, Chalqueño, heterosis, patrones heteróticos.

INTRODUCCIÓN

La heterosis o vigor híbrido, es la base del mejoramiento genético por hibridación. El fenómeno fue observado por primera vez por Darwin en 1871 (Wallace y Brown, 1956) y se define como la diferencia de vigor entre un híbrido F_1 y el promedio de sus progenitores. Las bases genéticas y la aplicación de heterosis fueron analizadas por primera vez en la reunión de Iowa en 1950 (Gowen, 1952) y por segunda vez en la ciudad de México en 1997 (Coors y Pandey, 1999). La explicación de la heterosis se basa en las hipótesis de dominancia y de sobredominancia (Allard, 1999). En términos de acción génica la heterosis se debe principalmente a efectos de interacción entre alelos o dominancia (Crown, 1999). En forma operativa, la heterosis se calcula como la diferencia entre el valor fenotípico de la F_1 y el progenitor medio o progenitor superior, y esta diferencia se expresa en porcentaje del progenitor medio o del progenitor superior (Falconer y Mackay, 1996). El primer caso se conoce como heterosis con respecto al progenitor medio y el segundo como heterosis con respecto al progenitor superior.

La heterosis es uno de los fenómenos biológicos que más interés ha despertado en la investigación debido a su importancia en el mejoramiento de las plantas. Es el resultado del cruzamiento de progenitores no emparentados que da oportunidad de obtener híbridos superiores a sus progenitores. Moll *et al.* (1962) definieron a la heterosis como un fenómeno en el cual el híbrido resultante del cruzamiento entre dos variedades es superior en crecimiento, tamaño, rendimiento y en vigor a éstas. Así mismo, señalan que en las cruzas intervarietales, en la medida que la divergencia genética entre los progenitores es mayor, también lo es la heterosis de la cruce; sin embargo, existe un grado óptimo de divergencia genética donde la heterosis puede ser máxima, puesto que cuando la divergencia genética es extremadamente grande la heterosis se puede reducir (Moll *et al.*, 1965).

variants of the same race, had the highest expression in both yield and its components as well as in morphology and phenology. There were significant interactions between the parent populations and outstanding heterotic patterns, being noticeable various combinations derived from Oax-814 and Zac-66, as influenced by a distant geographical origin associated with increased genetic divergence.

Key words: *Zea mays* L., Chalqueño, diallelic crosses, heterosis, heterotic patterns.

INTRODUCTION

Heterosis or hybrid vigor, is the base of genetic improvement through hybridization. It was first observed by Darwin in 1871 (Wallace and Brown, 1956) and is defined as the force difference between an F_1 hybrid and the parents' average. The genetic basis and heterosis application were analyzed for the first time at the Iowa meeting in 1950 (Gowen, 1952) and for the second time in Mexico City in 1997 (Coors and Pandey, 1999). The explanation of heterosis is based on the assumption of dominance and overdominance (Allard, 1999). In terms of gene action, heterosis is mainly due to interaction effects between alleles or dominance (Crown, 1999). Operationally, heterosis is calculated as the difference between the phenotypic value of F_1 and the medium parent or the superior parent, and this difference is expressed as a percentage of the medium parent or superior parent (Falconer and Mackay, 1996). The first case is known as heterosis regarding the medium parent and the second as heterosis in regard to the superior parent.

Heterosis is one of the biological phenomena that have aroused more interest in research due to its importance in plant breeding. Is the result of unrelated parents crossing, which allows superior hybrids. Moll *et al.* (1962) defined heterosis as a phenomenon in which the hybrid resulting from crosses between two varieties is higher in growth, size, performance and force to them. Also, note that in intervarietal crosses, insofar as genetic divergence between the parents is greater so is the heterosis of the crosses, however, there is an optimum degree of genetic divergence where heterosis can be maximum, inasmuch as genetic divergence is extremely large heterosis can be reduced (Moll *et al.*, 1965).

La divergencia genética es una condición necesaria, pero no suficiente para asegurar la expresión de la heterosis (Cress, 1966), pues los efectos positivos de la heterosis se han atribuido a efectos genéticos y de interacción, tales como la acumulación de efectos aditivos, la presencia de efectos de dominancia y sobredominancia, presencia de efectos epistáticos y la interacción genotipo ambiente. Así, para aprovechar los efectos positivos de la heterosis en la formación de híbridos de maíz, primero se busca la identificación de bases germoplásmicas con potencial heterótico, continuándose con la selección y derivación de líneas hasta un nivel alto de homocigosis, y concluyendo con la formación de cruza y su evaluación para identificar a aquellas de mayor rendimiento y adaptabilidad (Márquez, 1988; Gutiérrez *et al.*, 2004).

La obtención de híbridos de alto rendimiento depende de la heterosis que se genera en el cruzamiento de los progenitores; en cruza varietales en Estados Unidos de América la heterosis se modificó de -3.6 a 72% (Hallauer y Miranda, 1988), y en cruza de plasma germinal tropical por subtropical de México se modificó de -2.1 a 23.7% (Vasal *et al.*, 1992).

La heterosis para rendimiento de grano es atribuida a la heterosis para diferentes procesos fisiológicos que determinan al rendimiento de grano. Así, al estudiar 12 híbridos de maíz y sus siete líneas endogámicas parentales, se observó que la heterosis para rendimiento de grano podría ser atribuida a la heterosis para dos de sus componentes: el total de materia seca acumulada a la madurez y la proporción de materia seca que fue movilizada para la formación del grano (Tollenaar *et al.*, 2004).

No obstante la enorme variación del maíz en México clasificada en 59 razas (Sánchez *et al.*, 2000), las razas Tuxpeño, Celaya, Vandeño, Chalqueño y Cónico, han sido las más utilizadas en el mejoramiento genético de esta especie (Roberts, 1950) y en menor proporción las razas Cónico Norteño, Bolita, Pepitilla y Zapalote Chico (Gutiérrez y Luna, 1989; Gámez *et al.*, 1996). Específicamente el mejoramiento de maíz en Valles Altos de México está basado en poblaciones de la raza Chalqueño y Cónico que ocasionalmente se han cruzado con algunos materiales de las razas Celaya y Tuxpeño (Espinosa y Carballo, 1987).

Sin embargo, dentro de la misma raza Chalqueño, considerando el área geográfica en donde se distribuye, pueden existir poblaciones con potencial genético importante que no han sido consideradas para ampliar la base genética

The genetic divergence is a necessary but not sufficient condition to guarantee the heterosis expression (Cress, 1966); as the positive effects of heterosis have been attributed to genetic and interactions effects such as: the accumulation of additive effects, the presence of dominance and overdominance effects, presence of epistatic effects and genotype-environment interaction. Thus, to seize the positive effects of heterosis in the maize hybrids formation, first we seek to identify germplasmic bases with heterotic potential, and then continuing with the selection and derivation of lines to a high level of homozygosity and concluding with crosses forming and assessment to identify those with higher yield and adaptability (Márquez, 1988; Gutiérrez *et al.*, 2004).

Obtaining high yield hybrids, depends on the heterosis generated in the parents crossing, in variety crosses in United States, heterosis ranged from -3.6 to 72% (Hallauer and Miranda, 1988), and crosses of tropical and subtropical germplasm of Mexico it ranged from -2.1 to 23.7% (Vasal *et al.*, 1992).

The heterosis for grain yield is attributed to different physiological processes. Thus, studying twelve maize hybrids and their seven parental inbreeding lines, it was showed that the heterosis for grain yield could be attributed to heterosis for two of its components: the total accumulated dry matter at maturity and the proportion of dry matter that was mobilized for the grain formation (Tollenaar *et al.*, 2004).

Despite the enormous maize variation in Mexico, classified in 59 races (Sánchez *et al.*, 2000), Tuxpeño, Celaya, Vandeño, Chalqueño and Cónico races have been the most widely used in genetic improvement of this specie (Roberts, 1950) and in a smaller proportion: Cónico, Norteño, Bolita, Pepitilla and Zapalote Chico races (Gutiérrez and Luna, 1989; Gámez *et al.*, 1996). Specifically, the improvement of maize in Mexican Highlands is based on populations of Cónico and Chalqueño races that has been occasionally crossed with some materials of Tuxpeño and Celaya races (Espinosa and Carballo, 1987).

However, within the same Chalqueño race considering the geographic area where it is distributed, there may be populations with an important genetic potential that have not been considered to expand the genetic base of improvement programs. Therefore, we considered this study to assess the expression of heterosis based on the

en los programas de mejoramiento. Por lo anterior, se planteó el presente estudio con el objetivo de valorar la expresión de la heterosis en función del origen de las poblaciones progenitoras e identificar potenciales patrones heteróticos en el germoplasma disponible para Valles Altos factible de incorporarse a los programas de mejoramiento de maíz para incrementar la base genética existente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material genético. En el estudio se incluyeron poblaciones que cubrieran los criterios siguientes: a) que tuvieran antecedentes como material sobresaliente en estudios previos; b) su origen geográfico preferentemente estuviera limitado a los Valles Altos de México, más dos poblaciones contrastantes, una de Uruguay (Urg-II) y otra de Argentina (Arg-III), pertenecientes a la raza Cateto Sulino, con el propósito de explorar su respuesta heterótica; c) bajo nivel de mejoramiento genético; aunque por falta de semilla de algunas poblaciones se incluyeron sus versiones con cierto grado de mejoramiento, como el caso de VS-22 (Mich-21) y $F_{HC}H-129F_n$; y d) preferentemente provinieran de diferentes puntos del área de distribución de la raza Chalqueño o que fueran variantes de ésta (Chalqueño-Celaya, Chalqueño-Cónico), así como una población de la raza Ancho que comparte área cultivada con Chalqueño en el sureste del Estado de México.

El material genético estuvo constituido por 15 poblaciones de maíz y sus 105 cruza simples directas posibles, 14 cruza simples adicionales, cuatro poblaciones progenitoras adicionales y seis híbridos comerciales como testigos (Cuadro 1 y 2). El germoplasma adicional es material adaptado a los Valles Altos de México cuyos patrones heteróticos ya están establecidos. La semilla de las poblaciones fue proporcionada por el Banco de Germoplasma del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y por el programa de mejoramiento genético de maíz del Colegio de Postgraduados en Ciencia Agrícolas.

Obtención y evaluación de la F_1 . El cruzamiento entre progenitores se hizo en los ciclos agrícolas de primavera-verano 2005 y de otoño-invierno 2005-2006, en el Valle de México y en Iguala, Guerrero. La evaluación de las cruza se hizo en el ciclo agrícola primavera-verano de 2006 en tres localidades, Zotoluca, Apan, Hidalgo; Mixquiahuala, Hidalgo; y Santa Lucía, Texcoco, Estado de México (Cuadro 3).

origin of the parent populations and identify potential heterotic patterns in the germplasm available for High Valleys for incorporation into feasible maize breeding programs to increase the existing genetic base.

MATERIALS AND METHODS

Genetic material. The study included populations that covered the following criteria: a) material that had background as outstanding in previous studies, b) their geographical origin was preferentially confined to the Mexico's high valleys, plus two contrasting populations, one from Uruguay (Urg-II) and another one from Argentina (Arg-III), belonging to the Cateto Sulino race, in order to explore their heterotic response, c) that had low levels of genetic improvement, but for lack of seeds of some populations there were included versions with some improvement degree, as the case of VS-22 (Mich-21) and $F_{HC}H-129F_n$ and d) that came from different points from Chalqueño race range or their variants (Chalqueño-Celaya, Chalqueño-Cónico) and a population of Ancho race, which shares Chalqueño cultivated area in Mexico State southeast.

Thus, the genetic material was consisted by 15 maize populations and its possible direct 105 single crosses, 14 additional single crosses, 4 additional progenitor populations and 6 commercial hybrids as controls (Table 1 y 2). The additional germplasm is material adapted to the High Valleys of Mexico whose heterotic patterns are established. The seed stock was provided by the Germplasm Bank of the National of Forestry, Agriculture and Livestock Research Institute (INIFAP) and the Maize Genetic Improvement Program of the Postgraduated College.

Obtaining and evaluation of F_1 . The crossbreeding between parents was made in Spring-Summer 2005 and Autumn-Winter 2005-2006, agricultural cycles; in Mexico Valley and Iguala, Guerrero. The crosses evaluation was done during Spring-Summer of 2006 in three locations: Zotoluca, Apan, Hidalgo; Mixquiahuala, Hidalgo; and Santa Lucía, Texcoco, Mexico State (Table 3).

In the first two locations, farmers' fields were sowed and in the third, the grounds of the Valley of Mexico Experimental Station were sowed. In all three locations a 12*12

Cuadro 1. Poblaciones progenitoras y localización geográfica del estudio de heterosis. Primavera-verano, 2006.**Table 1. Progenitoras populations and geographic location of the heterosis study. Spring-Summer, 2006.**

Población	Edo/País	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Raza	Referencias
Hgo-4	Hidalgo					Chalqueño	Gámez <i>et al.</i> , 1996
Dgo-189	Durango	El Mezquital	23° 28'	104° 22'	1440	Chalqueño	LAMP, 1991
Gto-208	Guanajuato	León	21° 16'	101° 34'	2419	Chalq-Celaya	Romero <i>et al.</i> , 2002
Gto-142	Guanajuato	SM Allende	20° 55'	100° 45'	1990	Chalq-Celaya	Romero <i>et al.</i> , 2002
Méx-633	Edo. México	T. del Aire	19° 09'	98° 01'	2410	Chalqueño	Romero <i>et al.</i> , 2002
Col-03-64	Edo. México	Tepetlixpa	19° 16'	98° 49'	2393	Ancho	
Col-6784	Edo. México	Chalco	19° 16'	98° 54'	2240	Chalqueño	Herrera <i>et al.</i> , 2004
F _{HC} H-129F _n	Edo. México	Texcoco	19° 29'	98° 53'	2250	Chalqueño	Romero <i>et al.</i> , 2002
Zac-66	Zacatecas	Jerez	22° 38'	102° 58'	1900	Chalq-Cónico	LAMP, 1991
Oax-814	Oaxaca					Chalq-Cónico	LAMP, 1991
Jal-335	Jalisco	L. de Moreno	21° 22'	101° 55'	2130	Chalq-Celaya	
Tlax-151	Tlaxcala	Cuapixtla	19° 18'	97° 45'	2483	Chalq-Cónico	Gámez <i>et al.</i> , 1996
Urg-II	Uruguay					Cateto Sulino	Castillo y Goodman, 1989
VS-22	Michoacán	Zacapu	19° 31'	98° 53'	2353	Chalq-Cónico	Romero <i>et al.</i> , 2002
Arg-III	Argentina					Cateto Sulino	Castillo y Goodman, 1989

Cuadro 2. Poblaciones progenitoras y cruas simples adicionales con seis híbridos comerciales como testigos.**Table 2. Progenitoras populations and you cross simple additional six commercial hybrids like control.**

Progenitores	Cruas adicionales	Híbridos
Qro-46	Qro-46*Hgo-4	Méx-581Col-6784
Méx-581	Dgo-189*Qro-46	Zac-66*Méx-581
Pob-85 C4	Gto-142*Qro-46	Pob-85 C4*Zac-66
Pob-800 C5	Méx-633*Qro-46	VS-22*Pob-85 C4
	Qro-46*Oax-814	Pob-800 C5*Méx-581
	Méx-581*Dgo-189	Pob-800 C5*Tlax-151
	Méx-581*Gto-208	Pob-800 C5*Oax-708

Cuadro 3. Ubicación geográfica y características climatológicas de las localidades donde se realizó el estudio.**Table 3. Geographic location and climatologic characteristics of the localities where the study was realized.**

Localidad	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (m)	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)	Clima
Zotoluca	19° 37'	98° 31'	2599	14.4	622	Subhúmedo templado
Mixquiahuala	20° 14'	99° 12'	2050	17	509	Semiseco templado
Santa Lucía	19° 26'	98° 52'	2326	15.9	691.5	Semiseco templado

Fuente: García (1988).

En las primeras dos localidades se sembró en terrenos de agricultores y en la tercera, en terrenos del Campo Experimental Valle de México. En las tres localidades se utilizó un diseño experimental de látice 12*12 con tres repeticiones. Las fechas de siembra fueron el 5, 9 y 10 de mayo de 2006 en Zotoluca, Mixquiahuala, y Santa Lucía, respectivamente. En las localidades de Mixquiahuala y Santa

experimental lattice design was used with three replications. Sowing dates were the 5th, 9th and 10th of May 2006 in Zotoluca, Mixquiahuala and Santa Lucía, respectively. In Mixquiahuala and Santa Lucía, the experimental plot consisted of a furrow of 5.5 m long and 0.8 m wide, while in Zotoluca the furrow was of 4.5 m long and 0.8 m wide. At the time of sowing, three seeds

Lucía, la parcela experimental consistió de un surco de 5.5 m de largo por 0.8 m de ancho; mientras que en Zotoluca, fue de un surco de 4.5 m de largo y 0.8 m de ancho. Al momento de la siembra, se colocaron tres semillas cada 0.5 m, para finalmente dejar dos plantas, y con ello establecer una densidad de población de 50 000 plantas por hectárea.

Variables evaluadas. Se midieron y registraron 21 variables, de las cuales se eligieron las de mayor relevancia mediante un análisis de componentes principales, en donde se incluyó el rendimiento de grano (REN), índice de grano (IG), mazorcas por planta (MP), diámetro de mazorca (DM), largo de grano (LGr), número de hileras por mazorca (NHM), días a floración masculina (DFM) y altura de planta (AP).

Análisis estadísticos. Con el paquete estadístico SAS (SAS, 1994) se hicieron análisis de varianza, análisis de componentes principales y se calculó la heterosis en porcentajes con respecto al promedio de los progenitores, utilizando la ecuación: $H_{ij} = \{[C_{ij} - (P_i + P_j)/2] / [(P_i + P_j)/2]\} * 100$; donde: H_{ij} = heterosis en porcentaje; C_{ij} = valor de la cruce entre los progenitores i y j ; P_i = valor del progenitor i ; P_j = valor del progenitor j . En el análisis de varianza, la variación entre los tratamientos se partió en grupos (dialélico, progenitores, cruza adicionales, progenitores adicionales e híbridos comerciales testigo) y tratamientos dentro de grupo; la partición correspondiente se aplicó para la fuente de variación localidad*tratamiento.

El análisis de componentes principales, se hizo con el propósito de elegir a las variables de mayor relevancia y menor colinealidad en la interpretación de los resultados, graficando las correlaciones de los dos primeros componentes principales con cada variable, información que junto con los coeficientes de determinación fue útil para elegir a las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis global. En el Cuadro 4, se muestran los cuadrados medios del análisis de varianza combinado para las variables evaluadas, en los que se aprecian diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre localidades, entre grupos y entre poblaciones (tratamientos) dentro de grupos para las ocho variables evaluadas, mientras que la interacción Loc*Grupo sólo resultó altamente significativa para rendimiento de grano y mazorcas por planta, y significativa ($p \leq 0.05$) para diámetro de mazorca y altura de planta. Entre poblaciones dentro de grupos hubo diferencias altamente significativas

were placed every 0.5 m, to finally leave two plants, and thereby establish a population density of 50 000 plants per hectare.

Evaluated variables. Twenty-one variables were measured and recorded, the most important were elected by a principal component analysis, there were included: grain yield (GRY), grain index (GI), corncobs per plant (CCP), corncob diameter (CCD), grain length (GL), rows per corncob (RPCC), days to male flowering (DMF) and plant height (PH).

Statistical analysis. With the SAS statistical package (SAS Institute, 1994) there were made variance analyses, principal component analysis and heterosis was calculated as a percentage related to the parents average, using the next equation: $H_{ij} = \{[C_{ij} - (P_i + P_j)/2] / [(P_i + P_j)/2]\} * 100$; where H_{ij} = heterosis percentage, C_{ij} = cross between parents value (i and j), P_i = parent " i " value and P_j = parent " j " value. In the variance analysis, the variation between treatments were divided into groups (diallelic, parents, additional crosses, additional parents and commercial hybrids control) and treatments within the group, the corresponding division was applied to the variation source location*treatment.

The principal component analysis was done in order to choose the most relevant variables and less collinearity in the results interpretation, graphing the correlations of the two main components with each variable, that information coupled with the coefficients determination, was useful for variables selecting.

RESULTS AND DISCUSSION

Global analysis. Table 4 shows the mean squares of variance analysis combined for evaluated variables, appreciating highly significant differences ($p \leq 0.01$) between locations, groups and populations (treatments) within groups for the eight evaluated variables, while the Loc*Group interaction was highly significant only for grain yield and corncobs per plant, and significant ($p \leq 0.05$) for corncob diameter and plant height. Among populations within groups there were highly significant differences for all variables and their interaction with location (Loc*Trat) showed highly significant differences for grain yield, corncobs per plant, corncob diameter, grain length, days to male flowering variables and significant for plant height variable.

para todas las variables, y su interacción con localidad (Loc*Trat) mostró diferencias altamente significativas para las variables rendimiento de grano, mazorcas por planta, diámetro de mazorca, longitud de grano y días a floración masculina, y significativas para altura de planta.

Analyzing the treatments within each group, there were highly significant and significant differences within each of these for seven of the considered variables, while corncocks per plant in the hybrids group showed no significance. The differences between treatments within

Cuadro 4. Cuadrados medios del análisis de varianza combinado de la evaluación de cruas entre poblaciones nativas del Altiplano de México. Primavera-verano, 2006.

Table 4. Squared average of the combined analysis of variance of the evaluation of you cross between native populations of the Plateau of Mexico. Spring-Summer, 2006.

FV	GL	REN (t ha ⁻¹)	IG (%)	MP (Núm.)	DM (cm)	LGr (cm)	NHM (Núm.)	DFM (días)	AP (m)
Loc	2	268.68**	551.82*	5.17**	9.14**	2.56**	76.51**	59990.88**	19.59**
Rep (loc)	6	17.46**	9.88**	0.05	0.19*	0.09**	1.29	207.62**	0.39**
Grupos	4	108.78**	54.04**	0.33**	4.8**	0.51**	130.64**	758.5**	2.13**
Trat (grupo)	139	7.12**	23.63**	0.1**	1.02**	0.2**	20.94**	192.75**	0.32**
Trat (dial.)	104	6.42**	17.2**	0.1**	0.84**	0.15**	20.07**	158.93**	0.23**
Trat (prog.)	14	14.93**	72.27**	0.14**	2.68**	0.53**	44.08**	247.94**	0.85**
Trat (cruas adic.)	13	4.5**	18.99**	0.07**	0.73**	0.2**	10.61**	311.28**	0.23**
Trat (prog. adic.)	3	12.72*	50.62**	0.09*	2.04**	0.66**	4.48*	834.32**	1.3**
Trat (híb.)	5	3.18*	16.85**	0.05	0.3**	0.12**	10.74**	48.7**	0.28**
Loc*Grupo	8	4.15**	5.19	0.09**	0.18*	0.02	1.42	16.61	0.07*
Loc*Trat (grupo)	278	2.53**	4.02	0.04**	0.12**	0.02**	1.51	14.49**	0.04*
Loc*Trat (dial.)	208	2.43**	3.6	0.04**	0.12**	0.02**	1.6	13.08**	0.04
Loc*Trat (prog.)	28	5.16**	6.01*	0.06**	0.18**	0.03**	1.27	11.53	0.06*
Loc*Trat (cr. adic.)	26	1.56	5.73*	0.03	0.11	0.03**	0.97	10.15	0.03
Loc*Trat (prog. adic.)	6	1.31	3.16	0.05	0.16	0.01	2.89	91.88*	0.04
Loc*Trat (híb.)	10	0.59	3.14	0.03	0.02	0.02	0.86	17.12*	0.03
Error	858	1.25	3.57	0.03	0.09	0.02	1.62	9.31	0.03
Total	1295								
CV		19.6	2.1	16	5.8	10.7	8.6	3.4	7.1

GL= grados de libertad; REN= rendimiento de grano; IG= índice de grano; MP= número de mazorcas por planta; DM= diámetro de mazorca; LGr= longitud de grano; NHM= número de hileras por mazorca; DFM= días a floración masculina; AP= altura de planta; CV= coeficiente de variación.

Al analizar los tratamientos dentro de cada grupo, se detectaron diferencias altamente significativas y significativas dentro de cada uno de estos para siete de las variables consideradas, mientras que mazorcas por planta en el grupo de los híbridos, no mostró significancia. Las diferencias entre tratamientos dentro de cada grupo, considerando la interacción con la localidad, resultaron significativas y altamente significativas para las variables días a floración masculina entre las cruas del arreglo dialélico y entre progenitores adicionales, para rendimiento de grano, mazorcas por planta, diámetro de mazorca y largo de grano entre las cruas del arreglo dialélico

each group, considering location interaction, were significant and highly significant for days to male flowering among diallel crosses arrangement and between further parents. For grain yield, corncocks per plant, corncocks diameter and grain length among diallel arrangement crosses and between parents of that arrangement. For grain rate and grain length between additional crosses and for plant height only among diallel arrangement parents. No significance was found among commercial hybrids for all variables, except days to male flowering.

y entre progenitores de dicho arreglo, para índice de grano y longitud de grano entre cruzas adicionales; y para altura de planta únicamente entre progenitores del arreglo dialélico. No se encontró significancia entre híbridos comerciales para todas las variables, excepto días a floración masculina.

Análisis por grupos. En promedio las tres localidades, el grupo de los híbridos comerciales fue superior para seis de ocho características, mientras que para días a floración masculina y altura de planta la mayor expresión correspondió al grupo de cruas dialélicas y de sus progenitores (Cuadro 5).

Analysis per group. In all locations, the group of commercial hybrids was superior for six out of the eight characteristics, while for days to male flowering and plant height, the biggest expression corresponded to the group of diallel crosses and their parents (Table 5).

The diallel crosses and additional crosses group followed in order of importance in the variables expression, while groups of parents and additional parents had the lowest expression. Comparing the group of diallel crosses with that of their parents, the first one was superior in the expression of all

Cuadro 5. Valores promedio por grupo de poblaciones y sus cruzamientos para ocho características. Primavera-verano, 2006.

Table 5. Values average by group of populations and its crossovers for eight characteristics. Spring-Summer, 2006.

Grupo	REN (t ha ⁻¹)	IG (%)	MP (Núm.)	DM (cm)	LGr (cm)	NHM (Núm.)	DFM (días)	AP (m)
Cruzas dialélicas	5.9 b	88.1 a	1.05 a	5.16 b	1.27 a	14.65 c	89.83 b	2.56 a
Prog. de cruas dialélicas	4.5 c	87.29 b	0.96 b	4.95 c	1.2 b	14.49 c	91.45 a	2.48 a
Cruzas adicionales	5.72 b	88.2 a	1.01 a	5.16 b	1.28 a	15.77 b	87.83 c	2.43 b
Prog. de cruas adicionales	3.73 d	86.14 c	0.95 b	4.69 d	1.07 c	15.41 b	88.19 c	2.26 c
Híbridos comerciales	6.79 a	88.44 a	1.08 a	5.49 a	1.3 a	17.4 a	83.41 d	2.27 c
DSH _(0.05)	0.87	0.82	0.07	0.13	0.06	0.55	3	0.13

REN= rendimiento de grano; IG= índice de grano; MP= número de mazorcas por planta; DM= diámetro de mazorca; LGr= longitud de grano; NHM= número de hileras por mazorca; DFM= días a floración masculina; AP= altura de planta; DSH= diferencia significativa honesta.

El grupo de las cruas dialélicas y cruas adicionales siguieron en orden de importancia en la expresión de las variables; mientras que los grupos de progenitores y progenitores adicionales presentaron la menor expresión. Al comparar al grupo de las cruas dialélicas con el de sus progenitores, se observó superioridad del primero con respecto al segundo en la expresión de todas las variables. La heterosis promedio para rendimiento de grano fue de 31%, mientras que para los componentes de rendimiento fue menor: 9.4, 5.8, 4.2, 1% y 1% para mazorcas por planta, largo de grano, diámetro de mazorca, índice de grano y número de hileras por mazorca, respectivamente; así mismo, para altura de planta fue de 3.2% y para días a floración masculina de -1.8%.

Análisis por localidad y grupo. En promedio de los 144 genotipos, siete de las ocho variables sobresalieron en Santa Lucía, mientras que días a floración masculina en Zotoluca. En la interacción Loc*Grupo, el rendimiento de grano y mazorcas por planta resultaron altamente significativas, por lo que al analizar las medias por grupo en cada localidad, se observó que el grupo de los híbridos comerciales alcanzó rendimientos de 7.51, 6.81 y 6.04 t ha⁻¹, mientras que el

variables. The average heterosis for grain yield was 31%, while for the components of yield was lower: 9.4, 5.8, 4.2, 1% and 1% for corncocks per plant, grain length, corncob diameter, grain index, rows per corncob, respectively, likewise, for plant height was 3.2% and for days to male flowering of -1.8%.

Location and group analysis. An average of 144 genotypes, seven of the eight variables stood out in Santa Lucía, while the variable days to male flowering, excelled in Zotoluca. In the Location*Group interaction, grain yield and corncocks per plant were highly significant, so analyzing the means per group in each locality, it was noted that the group of commercial hybrids reached yields of 7.51, 6.81 and 6.04 t ha⁻¹, while diallel crosses was 6.88, 5.49 and 5.32 t ha⁻¹ in Santa Lucía, Zotoluca and Mixquiahuala, respectively (Table 6).

Heterosis in grain yield. It was observed that grain yield was positively correlated and highly significant (**) with components such as: corncob diameter (0.47), grain length (0.43), grain index (0.34) and corncob per plant (0.32) so with plant height (0.33) and days to male flowering (0.12).

de las cruzas dialélicas fue de 6.88, 5.49 y 5.32 t ha⁻¹ en las localidades de Santa Lucía, Zotoluca y Mixquiahuala, respectivamente (Cuadro 6).

Table 7 shows the means throughout environments of each cross evaluation and the percentage heterosis respect to the parent's average for grain yield. Progenitor populations

Cuadro 6. Valores promedio por grupo de poblaciones y sus cruzas en cada localidad para las variables de mayor relevancia. Primavera-verano, 2006.

Table 6. Values average by group of populations and his you cross in each locality for the variables of greater relevance. Spring-Summer, 2006.

Grupo	REN (t ha ⁻¹)	IG (%)	DM (cm)	MP (Núm.)	LGr (cm)	NHM (Núm.)	DFM (días)	AP (m)
Zotoluca, Apan, Hidalgo								
Cruzas dialélicas	5.49	86.75	4.97	1.04	1.18	14.49	103.21	2.5
Prog. de cruzas dialélicas	4.55	86.01	4.85	0.98	1.13	14.52	105.16	2.39
Cruzas adicionales	5.44	86.91	5.02	1.03	1.19	15.83	101.31	2.32
Prog. de cruzas adicionales	4.25	84.73	4.54	1.02	1	15.06	102.92	2.13
Híbridos comerciales	6.81	87.84	5.49	1.17	1.25	16.91	96.11	2.2
Promedio general	5.31	86.45	4.97	1.05	1.15	15.36	101.74	2.31
Mixquiahuala, Hidalgo								
Cruzas dialélicas	5.32	88.72	5.21	0.93	1.34	14.33	85.06	2.38
Prog. de cruzas dialélicas	3.86	87.59	4.98	0.9	1.24	14.09	85.64	2.33
Cruzas adicionales	5.27	89.27	5.15	0.9	1.32	15.22	83.02	2.3
Prog. de cruzas adicionales	2.6	86.73	4.75	0.83	1.1	15.45	83.5	2.18
Híbridos comerciales	6.04	88.84	5.42	0.96	1.33	17.21	79.22	2.18
Promedio general	4.62	88.23	5.1	0.9	1.27	15.26	83.29	2.27
Santa Lucía, Texcoco, Estado de México								
Cruzas dialélicas	6.88	88.82	5.28	1.17	1.3	15.13	81.21	2.81
Prog. de cruzas dialélicas	5.08	88.28	5.02	1.01	1.23	14.87	83.56	2.72
Cruzas adicionales	6.45	88.43	5.31	1.1	1.33	16.27	79.14	2.68
Prog. de cruzas adicionales	4.34	86.96	4.78	1.02	1.11	15.72	78.17	2.47
Híbridos comerciales	7.51	88.64	5.56	1.12	1.33	18.07	74.89	2.43
Promedio general	6.05	88.23	5.19	1.08	1.26	16.01	79.39	2.62
DSH _(0.05) grupos	0.87	0.82	0.13	0.07	0.06	0.55	3	0.13
DSH _(0.05) localidades	0.48	0.66	0.09	0.05	0.06	0.24	1.32	0.08

REN= rendimiento de grano; IG= índice de grano; MP= número de mazorcas por planta; DM= diámetro de mazorca; LGr= longitud de grano; NHM= número de hileras por mazorca; DFM= días a floración masculina; AP= altura de planta; DSH= diferencia significativa honesta.

Heterosis en rendimiento de grano. Se observó que el rendimiento de grano presentó correlación positiva y altamente significativa (**) con sus componentes como son: diámetro de mazorca (0.47), largo de grano (0.43), índice de grano (0.34) y mazorca por planta (0.32) así también con altura de planta (0.33) y días a floración masculina (0.12).

with high intrinsic value were: Gto-142, Col-03-64, Col-6784 and F_{HC}H-129F_n (between 5.7 and 6 t ha⁻¹), while the average yield of their crosses was superior for the next populations: Gto-208, Gto-142, Col-6784, F_{HC}H-129F_n, Zac-66, Oax-814, Tlax-151 and VS-22 (Mich-21) (between 6 and 6.5 t ha⁻¹), the response of populations Oax-

En el Cuadro 7 se presentan las medias a través de los ambientes de la evaluación de cada una de las cruzas y la heterosis porcentual con respecto al promedio de los progenitores para rendimiento de grano. Las poblaciones progenitoras con valor *per se* alto fueron: Gto-142, Col-03-64, Col-6784 y F_{HC}H-129F_n (entre 5.7 y 6.1 t ha⁻¹), mientras que el rendimiento promedio a través de sus cruzas fue superior para las poblaciones Gto-208, Gto-142, Col-6784, F_{HC}H-129F_n, Zac-66, Oax-814, Tlax-151 y VS-22 (Mich-21) (entre 6 y 6.5 t ha⁻¹), siendo notoria la respuesta de las poblaciones Oax-814 y Zac-66, dado que como poblaciones presentaron rendimiento *per se* bajo (± 3.5 t ha⁻¹), pero en promedio de sus cruzas fueron sobresalientes, resultados que concuerdan con los obtenidos por Escorcia *et al.* (2010), quienes evaluaron cruzamientos simples de maíz y una de las cruzas tuvo alto rendimiento con heterosis de 32.6%. La heterosis global promedio fue de 34%, porcentaje relevante ya que es superior al encontrado por Vasal *et al.* (1995) en su evaluación sobre heterosis en germoplasma de maíz de Valles Altos.

814 and Zac-66 was remarkable, since as populations, showed poor yield (± 3.5 t ha⁻¹), their crosses average was outstanding, these results agree with those obtained by Escorcia *et al.* (2010), who evaluated single maize crosses in which one of the them had high yield and heterosis of 32.6%. The global average heterosis was 34%, a significant percentage that is higher than that found by Vasal *et al.* (1995) in his evaluation of maize germplasm heterosis of High Valley.

Moreover, in general heterosis terms, the results for yield in this work were higher than those found by Romero *et al.* (2002), since they obtained a global heterosis percentage of 14.6% with respect to the average parent. Due to the equation structure used to heterosis estimating, its value tends to rise when any parent has a poor behavior, so that Urg-II and Arg-III and III showed high heterosis and intermediate crosses yield, results that are similar to those reported by Morales *et al.* (2007) in his work on phenotypic relationships among commercial hybrids and exotic germplasm of maize.

Cuadro 7. Rendimiento de grano (t ha⁻¹) en tres ambientes de evaluación de las poblaciones progenitoras *per se* (en la diagonal) y de sus cruzas dialélicas (debajo de la diagonal) y porcentaje de heterosis de las cruzas (arriba de la diagonal). Primavera-verano, 2006.

Table 7. Grain yield (t ha⁻¹) in three atmospheres of evaluation of progenitoras populations *per se* (in the diagonal) and of his you cross dialélicas (underneath the diagonal) and percentage of heterosis you cross of them (above of the diagonal). Spring-Summer, 2006.

Progenitores	2	3	5	6	7	8	9	10	12	15	16	18	20	21	22	$\bar{X}$
Hgo-4 (2)	3.8	40.8	29.3	28.3	42.9	27.9	19.4	31.3	41.4	39.5	21.1	34	61.2	25.5	82.2	37.5
Dgo-189 (3)	5.3	3.6	45.9	25.7	42.2	13.6	12.5	48.1	27	46.5	16.1	43.2	68	47.7	43.2	37.2
Gto-208 (5)	5.5	6.1	4.7	24.5	19.7	20.7	9.4	14.4	34.7	62	8.2	30.1	52.4	33.1	83.6	33.4
Gto-142 (6)	6	5.9	6.4	5.7	31	32.6	14.4	7.8	27.4	54	7.8	31.8	55.1	23.5	39.2	28.8
Méx-633 (7)	6	6	5.6	6.8	4.7	16.9	12.6	6.6	48.7	18.3	31.1	0.6	36	21.3	46.1	26.7
Col-03-64 (8)	6.1	5.4	6.3	7.6	6.1	5.8	2.2	11.3	28.6	29.5	9.4	-39.3	30	32.6	8.5	16
Col-6784 (9)	5.9	5.5	5.9	6.7	6	6.1	6	5.4	51.9	57.9	-5.1	16.2	53	8.7	60.8	22.8
F _{HC} H-129F _n (10)	6.4	7.2	6.1	6.3	5.7	6.6	6.4	6.1	42	66.3	-0.3	5.3	48.9	24.3	30.1	24.4
Zac-66 (12)	5.1	4.5	5.5	5.8	6	6	7.2	6.7	3.4	59.2	65.1	40.2	85.7	59.6	98.8	50.7
Oax-814 (15)	5	5.3	6.6	7	4.8	6	7.5	7.9	5.5	3.5	28.4	58.5	80.8	37.2	83.2	51.5
Jal-335 (16)	5.4	5.2	5.3	5.8	6.5	6	5.3	5.6	7.1	5.5	5.2	25.7	51.8	25.6	35.3	22.9
Tlax-151 (18)	6.1	6.5	6.5	7.2	5	3.4	6.6	6	6.1	7	6.6	5.3	19.5	29.4	51.5	24.8
Urg-II (20)	5	5.2	5.5	6.3	4.9	5.4	6.5	6.4	5.5	5.4	5.8	4.7	2.3	29.3	27.9	50
VS-22 (21)	5.7	6.6	6.6	6.7	6	7.4	6.1	7	6.9	6	6.6	6.8	5	5.3	40.5	31.3
Arg-III (22)	5.5	4.3	6.4	5.5	5.1	4.4	6.7	5.4	5.7	5.3	5	5.8	3.1	5.3	2.3	52.2
$\bar{X}$	5.6	5.6	6	6.5	5.7	5.9	6.3	6.4	6	6.1	5.8	6	5.3	6.3	5.2	5.9/34

Por otra parte, en términos de heterosis general, los resultados obtenidos para rendimiento en este trabajo fueron superiores a los encontrados por Romero *et al.* (2002), ya

The emphasis on Oax-814 and Zac-66 populations, due to its heterosis average about 50%, is associated with the occurrence of at least three outstanding crosses as a result

que obtuvieron heterosis global con respecto al progenitor medio de 14.6%. Debido a la estructura de la ecuación con la que se estima la heterosis, su valor tiende a ser grande cuando alguno de los progenitores presenta un comportamiento pobre; de modo que Urg-II y Arg-III presentaron en promedio alta heterosis pero el rendimiento de sus cruzas es intermedio, resultados que son similares a los encontrados por Morales *et al.* (2007) en su trabajo sobre relaciones fenotípicas entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz.

El énfasis sobre las poblaciones Oax-814 y Zac-66 obedece a que su heterosis promedio, del orden de 50%, está asociado a la ocurrencia de al menos tres cruzamientos sobresalientes como resultado del mayor contraste en divergencia genética, mientras que las heterosis promedio para los otros progenitores sobresalientes fluctuó entre 22.8 y 33%. Por otra parte, se considera que el rendimiento promedio de las cruzas de las poblaciones Gto-142, Col-6784, F_{HC}H-129F_n y VS-22 (Mich-21) fue el más alto porque al buen comportamiento del progenitor se agrega el efecto de interacción, dando como resultado heterosis general alta.

La población Mich-21, representada por la versión VS-22, ha sido de uso intenso en los programas de mejoramiento genético del Altiplano de México; con esta información específica sobre las poblaciones en el estudio, se puede considerar que la población Gto-142, Col-6784 y F_{HC}H-129F_n pueden de manera directa ampliar la base de diversidad en los programas de mejoramiento en Valles Altos; además, al considerar su origen geográfico puede estudiarse la posible detección de mejores materiales. Lo anterior se refuerza con lo reportado por Esquivel *et al.* (2009), quienes encontraron que en etapas tempranas del desarrollo, la heterosis fue sobresaliente para las variables biomasa total y altura de planta en las poblaciones indicadas.

El comportamiento de cruzamientos de manera individual, la componente de interacción es importante, de modo que es deseable que un buen cruzamiento presente tanto efectos aditivos como de interacción positiva en grado óptimo, tal como lo indican Psarayi y Vivek (2008) en un estudio sobre aptitud combinatoria en maíces precoces del CIMMYT. Por otra parte, es notable que el grupo de cruzamientos superiores a los testigos comerciales participaron también poblaciones progenitoras con origen geográfico divergente, factor que determinó la expresión

of genetic divergence greater contrast, while average heterosis for other outstanding parents fluctuated between 22.8 and 33%. Moreover, it is considered that the average performance of crosses between Gto-142, Col-6784, F_{HC}H-129F_n y VS-22 (Mich-21) populations, was higher due to the good yield of the parent in addition to the interaction effect, resulting in high overall heterosis.

Mich-21 population, represented by the VS-22 version has been very used in genetic improvement programs in Mexican Highlands. With this specific information about the study populations, it can be considered that Gto-142, Col-6784 and F_{HC}H-129F_n populations, can directly expand the diversity base in improvement programs in High Valleys, also considering its geographical origin the possible detection of best materials can be studied. This is reinforced with those reported by Esquivel *et al.* (2009), who found that in early development stages, heterosis was outstanding for the total biomass and plant height variables in the listed populations.

The interaction component in the individual crosses behavior is important, so that, it is desirable that a good cross presents optimum additive and positive interaction effects, as indicated by Psarayi and Vivek (2008) in a study on combining ability of CIMMYT early maize. On the other hand, it is remarkable that in the group of crosses over commercial control, also took progenitor populations with differing geographical origin, a factor that determined the average outstanding heterotic expression. In this regard, Guillen de la Cruz *et al.* (2009) found that when genetic divergence in maize populations increases, the differences in both agronomic and physiological characteristics of their progeny are more evident.

The highest yield crossing was the F_{HC}H-129F_n*Oax-814 with 7.9 t ha⁻¹, which also had a significant heterosis percentage (66%), but without reaching the maximum recorded in all crosses, this heterosis estimation was promoted by the poor yield of Oax-814 population, considered within an acceptable level, since both parents are outstanding because of their average yield, shows important percentage heterosis.

Figure 1 shows the grain yield divided in medium parent and heterosis, which corresponds to the highest diallel yield crosses and their corresponding heterosis percentage, as well as the VS-22*Pob-85-C4 cross, referred as one of the heterotic patterns currently used in commercial hybrids

heterótica promedio sobresaliente. Al respecto, Guillen de la Cruz *et al.* (2009) encontraron en poblaciones de maíz, que a medida que se incrementa la divergencia genética de éstas, las diferencias tanto en características agronómicas como fisiológicas de sus progenies son más evidentes.

La crusa de mayor rendimiento fue la $F_{HC}H-129F_n \times Oax-814$ con 7.9 t ha^{-1} , que también tuvo un porcentaje de heterosis importante (66%), pero sin llegar al máximo registrado en el conjunto de cruzas; la estimación de esta heterosis estuvo favorecida por el rendimiento bajo de la población Oax-814, considerándose dentro de un nivel aceptable, ya que dos progenitores sobresalientes por su rendimiento promedio muestran heterosis porcentual importante.

En la Figura 1 se muestra el rendimiento de grano dividido en progenitor medio y heterosis, que corresponde a las cruzas dialélicas de mayor rendimiento promedio y su heterosis porcentual correspondiente, así como a la crusa VS-22*Pob-85-C4, referida como uno de los patrones heteróticos que actualmente se han utilizado en la generación de híbridos comerciales para Valles Altos. Otro caso semejante es el cruzamiento VS-22*Tlax-151, usado como patrón heterótico en híbridos de liberación reciente como el H-64E y H-66E, generados por el INIFAP para las condiciones de Valles Altos de México, por lo que el gráfico muestra la existencia de patrones heteróticos superiores a los ya identificados.

En dicha figura, es notoria la participación frecuente de Oax-814 y Zac-66 en los cruzamientos sobresalientes, que se relaciona con la ubicación latitudinal de dichas poblaciones, pues éstas se encuentran en los extremos del área de distribución de la raza Chalqueño.

CONCLUSIONES

La heterosis promedio global de las cruzas entre las 15 poblaciones fue superior al encontrado en otros trabajos similares previos, esto permitió identificar con cierta seguridad a las poblaciones Méx-633, Col-03-64, Col-6784 y $F_{HC}H-129F_n$ de la raza Chalqueño, y Gto-142, Zac-66, Tlax-151 y VS-22, variantes de la misma raza, como las más aptas para generar combinaciones con potencial para rendimiento de grano, haciéndose notoria

generation for High Valleys. Another similar case is the VS-22*Tlax-151 cross, used as heterotic standard in recent released hybrids as the H-64E and H-66E, which were generated by the INIFAP for the conditions of the High Valleys of Mexico, so the graph shows the existence of superior heterotic patterns than those already identified.

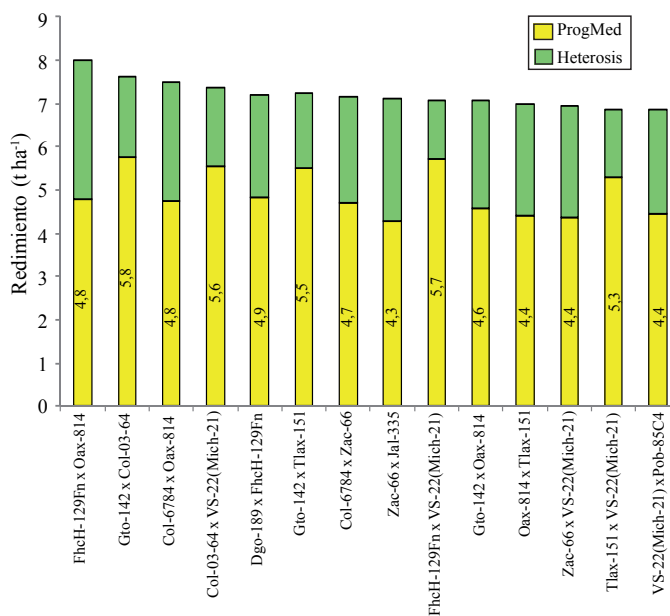


Figura 1. Rendimiento (progenitor medio y heterosis) de cruzas sobresalientes con relación a los patrones heteróticos VS-22*Pob-85 C4 y Tlax-151*VS-22. Primavera-verano, 2006.

Figure 1. Yield (average parent and heterosis) of you cross outstanding in relation to heterotic patterns VS-22*Pob-85 C4 and Tlax-151*VS-22. Spring-Summer, 2006.

In this figure, it is obvious the frequent participation of Oax-814 and Zac-66 in outstanding crosses. This is related to the latitudinal location of these populations, as they are in the extreme distribution range of Chalqueño race.

CONCLUSIONS

The global average heterosis of the crosses among 15 populations, was higher than those found in previous similar studies, which allowed us to identify with some confidence the next populations: Méx-633, Col-03-64, Col-6784 y $F_{HC}H-129F_n$ of Chalqueño race and Gto-142, Zac-66, Tlax-151 and VS-22, variants of the same race as the most suitable to generate combinations with grain yield

la expresión en las poblaciones de la raza Chalqueño al cruzarse con las variantes de la misma raza, y en segundo término cuando éstas se cruzaron entre sí.

Las poblaciones Gto-142, Col-6784 y $F_{HC}H-129_n$, identificadas como sobresalientes pueden de manera directa ampliar la base de la diversidad en los programas de mejoramiento en Valles Altos; además, debido a su diferente origen geográfico pueden estudiarse para la posible detección de mejores materiales.

Las poblaciones Zac-66 y Oax-814 tuvieron bajo comportamiento *per se* para rendimiento, pero el promedio a través de sus cruzas fue considerable, que se reflejó en porcentajes de heterosis relevantes como producto de la divergencia genética, ya que dichas poblaciones se ubican en los extremos del área geográfica de distribución de Chalqueño.

potential, becoming notorious the expression in Chalqueño race populations when crossed with variants of the same race and second, when they crossed with each other.

Gto-142, Col-6784 and $F_{HC}H-129_n$ populations are identified as outstanding, can directly expand the diversity base of improvement programs in High Valleys, also because of their different geographic origins, they can be studied for the possible detection of better materials in High Valleys of Mexico.

Zac-66 and Oax-814 populations, had low yield *per se*, but their average crosses was considerable, and this was reflected in significant heterosis percentages as a product of genetic divergence, because these populations are located at the ends of the geographic area of Chalqueño distribution.

End of the English version

LITERATURA CITADA

-
- Allard, R. W. 1999. Principles of Plant Breeding. 2nd Edition. John Wiley. New York, USA. 254 p.
- Castillo, G. F. and Goodman, M. M. 1989. Agronomic evaluation of Latin America maize accessions. *Crop Sci.* 29(4):853-861.
- Coors, J. G. and Pandey, S. 1999. The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. 524 p.
- Cress, C. E. 1966. Heterosis of the hybrid related to gene frequency differences between two populations. *Genetics.* 53:269-274.
- Crown, J. F. 1999. Dominance and overdominance. In: the genetics and exploitation of heterosis in Crops. J. C. Coors and S Pandey (eds.) American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. 524 p.
- Escorcía, G. N.; Molina, G. J. D.; Castillo, G. F. y Mejía, C. J. A. 2010. Rendimiento, heterosis y depresión endogámica de cruzas simples de maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 33:271-279.
- Espinosa, C. A. y Carballo, C. A. 1987. H-135 nuevo maíz híbrido de riego para la zona de transición El Bajío-Valles Altos. INIFAP-SAGARPA-CEVAMEX. Folleto técnico. Núm. 1. Chapingo, Estado de México. 16 p.
- Esquivel, E. G.; Castillo, G. F.; Hernández, C. J. M.; Santacruz, V. A.; García, S. G.; Acosta, G. J. A. y Ramírez, H. A. 2009. Aptitud combinatoria y heterosis en etapas tempranas del desarrollo del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 32:311-318.
- Falconer, D. S. and Mackay, T. F. C. 1996. Introduction to quantitative genetics. 4th Edition. Longman. Essex, England. 464 p.
- Gámez, V. A. J.; Avila, P. M. A.; Angeles, A. H.; Díaz, H. C.; Ramírez, V. H.; Alejo, J. A. y Terrón, I. A. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Publicación especial. Núm. 16. INIFAP-SAGAR. Toluca, México. 103 p.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. D. F., México. 217 p.
- Guillen, C. P.; De la Cruz, L. E.; Castañón, N. G.; Osorio, O. R.; Brito, M. N. P.; Lozano, R. A. y López, N. U. 2009. Aptitud combinatoria general y específica de germoplasma tropical de maíz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 10(1):101-107.
- Gutiérrez, R. E.; Espinoza, B. A.; Palomo, G. A.; Lozano, G. J. J. y Antuna, G. O. 2004. Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la Comarca Lagunera. *Rev. Fitotec. Méx.* 27(1):7-11.

- Gutiérrez, S. J. R. y Luna, F. M. 1989. Selecciones para resistencia a sequía en un compuesto de maíz en Zacatecas. *Rev. Fitotec. Mex.* 12:94-104.
- Gowen, J. W. 1952. Heterosis. Iowa State College Press, Ames. 552 p.
- Hallauer, A. R. and Miranda, J. B. 1988. Quantitative genetics in maize breeding. 2nd Edition. Iowa State University Press. Ames, IA, USA. 468 p.
- Herrera, C. B. E.; Castillo, G. F.; Sánchez, G. J. J.; Hernández, C. J. M.; Ortega, P. R. y Goodman, M. M. 2004. Diversidad genética del maíz Chalqueño. *Agrociencia*. 38:191-206.
- Proyecto Latinoamericano de Maíz (LAMP). 1991. Catálogo de germoplasma de maíz. Tomo I y II. Proyecto Latinoamericano de Maíz. (LAMP). D. F., México. 678 p.
- Márquez, S. F. 1988. Genotecnia vegetal. Tomo II. AGT Editor. D. F., México. 563 p.
- Moll, R. H.; Salhuana, W. S. and Robinson, H. F. 1962. Heterosis and genetic diversity in variety crosses of maize. *Crop Sci.* 2:197-198.
- Moll, R. H.; Lonnquist, J. H.; Vélez, F. J. and Johnson, E. C. 1965. The relationship of heterosis and divergence in maize. *Genetics*. 52:139-144.
- Morales, R. M. N.; Ron, P. J.; Sánchez, G. J. J.; Ramírez, D. J. L.; De la Cruz, L. L.; Mena, M. S.; Hurtado, P. S. y Chuela, B. M. 2007. Relaciones fenotípicas entre híbridos comerciales y germoplasma exótico de maíz en Jalisco, México. *Rev. Fitotec. Mex.* 30:285-294.
- Pswarayi, A. and Vivek, B. S. 2008. Combining ability amongst CIMMYT's early maturing maize (*Zeamays* L.) germplasm under stress and non-stress conditions and identification of testers. *Euphytica*. 162:353-362.
- Roberts, L. M. 1950. Las razas mexicanas de maíz más útiles como material básico para el mejoramiento. *In: Primera Asamblea Latinoamericana de Fitogenetistas*. Oficina de Estudios Especiales. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México. Folleto misceláneo. Núm. 3. 71-84 pp.
- Romero, P. J.; Castillo, G. F. y Ortega, P. R. 2002. Cruzas de poblaciones nativas de maíz de la raza Chalqueño: II. Grupos genéticos, divergencia genética y heterosis. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:107-115.
- Sánchez, G. J. J.; Goodman, M. M. and Stuber, C. W. 2000. Isozymatic and morphological diversity in the races of maize of Mexico. *Econ. Bot.* 54(1):43-59.
- SAS Institute. 1994. The SAS System for Windows. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Tollenaar, M.; Ahmadzadeh, A. and Lee, E. A. 2004. Physiological basis of heterosis for grain yield in maize. *Crop Sci.* 44:2086-2094.
- Vasal, S. K.; Srinivasan, G.; González, C. F.; Han, G. C.; Pandey, S.; Beck, D. L. and Crossa, J. 1992. Heterosis and combining ability of CIMMYT's tropical x subtropical maize germoplasm. *Crop Sci.* 32:1483-1489.
- Vasal, S. K.; Dhillon, B. S.; Srinivasan, G.; Mclean, S. D.; Crossa, J. and Zhang, S. H. 1995. Effect of S₃ recurrent selection in four tropical maize populations on their selfed and randomly mated generations. *Crop Sci.* 35:697-702.
- Wallace, H. A. and Brown, W. L. 1956. The great grandfather of hybrid corn: Charles Darwin. *In: corn and its early fathers*. The Michigan State University Press. 134 p.